



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 باجي مختار- عنابة

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA

FACULTÉ DES SCIENCES

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE

LABORATOIRE DES SEMI-CONDUCTEURS

## THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

### DOCTORAT

Filière: Physique

Spécialité : Physique des Matériaux et Composants

Étude et optimisation des propriétés élastiques  
de la structure  $AlGaAs/GaAs$

Par :

Amina OUCHTATI

Devant le jury :

Président:	TOUAM Tahar	Professeur	UBM-Annaba
Directeur de Thèse:	HADJOUR Zahia	Professeur	UBM-Annaba
Codirecteur de Thèse	KHOULDIA Assia	MCB	UBM-Annaba
Examinateurs:	HADJOURJA Bouzid	Professeur	UBM-Annaba
	HAMDI Salah	MCA	Univ. Taref

Année Universitaire : 2021/2022

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail:*

*À la plus belle créature que Dieu a créée sur terre,,,  
À cet source de tendresse, de patience et de générosité,,,*

*À ma chère mère !*

*À mon très cher père*

*À mon cher frère; Walid*

*À mes chers sœurs ; Hana, Chourouk, et Douaa.*

*À tous mes enseignants*

*À tous ceux qui m'ont soutenue*

*Tous mes collègues et mes amis*

*À tous ceux que j'aime.*

AMINA

# Remerciements

*Louange à Dieu tout puissant et clément qui m'a guidée de poursuivre mes études supérieures, et qui m'a offert la santé, la force et la volonté pour réaliser ce travail.*

*Ce travail a été réalisé au Laboratoire des Semi-Conducteur, LSC, Département de Physique, Faculté des Sciences, Université Badji Mokhtar, Annaba UBMA. Je remercie chaleureusement **Mr. Abdellaziz DOGHMANE**, Professeur à l'UBMA et Directeur du Laboratoire, de m'avoir accueilli dans son laboratoire et facilité mon intégration au sein de l'équipe "Composant Unipolaire et Micro-acoustique ". Je le remercie également pour toute son aide, sa disponibilité, sa pédagogie, sa gentillesse et surtout pour son bon humeur. Je le remercie notamment d'avoir été disponible et prêt à avoir des discussions scientifiques à toutes heures et prêt à m'aider à tout moment.*

*Mes remerciements et toute ma gratitude à mon professeur et ma directrice de thèse Madame **Zahia Hadjoub**, professeur à l'UBMA qui a accepté de diriger et suivre ce travail de Doctorat au sein de son équipe. Je la remercie pour ses conseils qui ont été vraiment appréciés et ses qualités humaines. Je tiens aussi à la remercier pour sa disponibilité, sa pédagogie, sa gentillesse, sa confiance dont elle m'a clairement fait sentir et pour les nombreux encouragements qu'elle m'a prodigués. Qu'elle trouve ici l'expression de mon profond respect et de mes meilleures considérations.*

*Mes remerciements vont également à Monsieur **Tahar Touam**, Professeur à l'université d'Annaba, Doyen de la Faculté des Sciences à l'UBMA, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance avec une grande sympathie. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère gratitude et mon profond respect.*

*Mes remerciements sont adressés également à mon Co-encadreur de thèse Mme **Assia KHOUALDIA**, MCB à UBMA, pour son soutien, ses conseils et ses encouragements.*

*Je remercie particulièrement Mr **Salah HAMDI**, maitre de conférence à l'université El-Taref, et Mr. **Bouzid HADJOUJJA**, professeur à l'UBMA, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail. Je les remercie également pour l'intérêt porté à ce travail et pour leur contribution à son évaluation; qu'ils trouvent ici mes meilleures considérations et mon profond respect.*

*Je remercie également tous mes enseignants du département de physique à l'UBMA, mes amis et collègues du laboratoire des Semi-Conducteurs.*

*Enfin, je tiens à exprimer ma gratitude et mes remerciements de tout mon cœur à mes parents, mon frère et mes sœurs pour leur soutien, leur encouragement et leur amour.*

# دراسة وتحسين الخصائص المرنة للبنية AlGaAs/GaAs

## ملخص

تمت دراسة و تحليل الوسائط المرنة للمواد GaAs و AlAs و مركباتها الثلاثية  $Al_xGa_{1-x}As$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) بواسطة المجهرية الصوتية. اعتبرنا تأثيرات تركيز Al،  $x$ ، و تباين المواد على عدة وسائط: معامل الانعكاس، الإمضاء الصوتي،  $V(z)$ ، الزوايا الحرجة للأنماط المنعكسة، الدور الفضائي لـ  $V(z)$ ، أطياف FFT و سرعات الأمواج الموافقة لها، حيث قمنا بتحليلها و مناقشتها. بينت النتائج المتحصل عليها أنه عندما يزداد نسبة Al، يظهر العديد من السلوكيات: (أ) تنخفض جميع الزوايا الحرجة للأنماط المختلفة (الطولية و العرضية و رايلي)، (ب) تزداد جميع الفترات المكانية و (ج) تزداد سرعة أمواج رايلي الطولية. علاوة على ذلك، أكد هذا التحليل أيضاً تبدد وسائط البنية  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  بدالة السمك المنضم للطبقة،  $d/\lambda_T$ ، يتغير مع مختلف الاتجاهات البلورية المعتبرة: [100]، [111] أو [110]. علاوة على ذلك، تم تحديد الاختلافات في الوسائط،  $P$ ، و تم العثور على صيغ شبه تجريبية بالشكل:  $P = Ax^2 + Bx + C$  حيث أن هذه الصيغ، تمكننا من استنتاج معلومات جد قيمة و مهمة من أجل تمييز البنية  $Al_{0,4}Ga_{0,6}As/GaAs$ .

**الكلمات المفتاحية:**  $Al_xGa_{1-x}As$ ، الوسائط المرنة، المجهرية الصوتية، الإمضاء الصوتي، معامل الانعكاس.

# Study and optimization of elastic properties of the AlGaAs /GaAs structure

## ABSTRACT

---

Elastic parameters of GaAs, AlAs and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) alloys are numerically determined and analyzed on the basis of scanning acoustic microscopy technique. Thus, the dependence of Al concentrations,  $x$ , and material anisotropy on all features of reflection coefficient and acoustic materials signatures, critical angles of reflected modes, spatial periods, peaks of FFT spectra and their corresponding wave velocities, has been considered, analyzed and discussed. It is found that as Al content increases several behaviors are obtained: (i) all critical angles of longitudinal, transverse and Rayleigh waves, decrease, (ii) all spatial periods increase and (ii) both Rayleigh and longitudinal wave velocities increase. Moreover, this analysis also confirmed that the dispersion of the parameters of the  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  /GaAs structure as a function of the normalized thickness of the  $d/\lambda_T$  layer, differently change with the considered crystallographic direction: [111], [100] or [110]. Furthermore, the variations of these parameters,  $P$ , were quantified and semi-empirical formulas were found to be of the form:  $P = Ax^2 + Bx + C$ ; from these formulas, valuable information can be derived and are of great importance for  $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$  /GaAs structure characterization.

**Key words:**  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , Elastic parameters, Scanning acoustic microscopy, Acoustic materials signatures, Reflection coefficient.

# Étude et optimisation des propriétés élastiques de la structure AlGaAs /GaAs

## RÉSUMÉ

---

Les paramètres élastiques des matériaux GaAs, AlAs et leurs alliages ternaires  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) sont déterminés et analysés selon la technique de la microscopie acoustique à balayage. Ainsi, les effets de la fraction de l'aluminium,  $x$ , et de l'anisotropie des matériaux sur plusieurs paramètres,  $P$ , (coefficient de réflexion, signatures acoustiques, angles critiques des modes réfléchis, périodes spatiales des  $V(z)$ , spectres de FFT et vitesses d'onde correspondantes) ont été considérés, analysés et discutés. Il a été démontré que lorsque la fraction d'Al augmente, plusieurs comportements sont obtenus : (i) tous les angles critiques des différents modes (longitudinale, transversale et Rayleigh) diminuent, (ii) toutes les périodes spatiales augmentent et (iii) les vitesses des ondes de Rayleigh et des Skimming augmentent. Par ailleurs, cette analyse a également confirmé que la dispersion des paramètres de la structure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  en fonction de l'épaisseur normalisée de la couche  $d/\lambda_T$ , évolue différemment selon la direction cristallographique considérée : [111], [100] ou [110]. De plus, les variations des paramètres,  $P$ , ont été quantifiées et des formules semi-empiriques ont été déterminées de la forme:  $P = Ax^2 + Bx + C$  ; à partir de ces formules, des informations précieuses peuvent être déduites et qui sont d'une importance capitale pour la caractérisation de la structure  $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}/\text{GaAs}$ .

**Mots clés :**  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , Paramètres élastiques, Microscopie acoustique, Signatures acoustiques, Coefficient de réflexion.

# TABLE DES MATIERES

---

Introduction Générale	01
<b>Chapitre I : SEMI-CONDUCTEURS III-V ET LEURS APPLICATIONS</b>	
<hr/>	
I.1 Introduction	06
I.2 Semi-Conducteurs Composés III-V	07
I.3 Propriétés Structurales des Composés III-V	08
I.3.1 Arséniure de Gallium	09
a) Structure	09
b) Propriétés du GaAs	10
I.3.2 Arséniure d'Aluminium	11
a) Structure	11
b) Propriétés de AlAs	11
I.4 Alliage Ternaires des Semi-Conducteurs III-V	11
I.4.1 Définition d'un Alliage	12
I.4.2 Classification des Alliages	12
I.5 Composé $Al_xGa_{1-x}As$	13
I.5.1 Structure Cristalline	13
I.5.2 Constante du Réseau	15
I.5.3 Propriétés de l' $Al_xGa_{1-x}As$	16
I.6 Structure des Bandes	18
I.6.1 Gap Direct et Gap Indirect	18
I.6.2 Gap D'énergie de La Structure $Al_xGa_{1-x}As$	19
I.6.3 Discontinuités des Bandes dans l'Hétérostructure $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$	20
a) L'hétérojonction $AlGaAs/GaAs$	20

---



<i>b) Discontinuités des Bandes</i>	22
I.7 Applications	23
I.7.1 Diodes	23
<i>a) Diode Laser</i>	24
<i>b) Les Diodes Electroluminescentes LED</i>	24
I.7.2 Cellule Solaire	25
I.7.3 Réseaux Nano Fils $Al_xGa_{1-x}As$	26
I.7.4 Capteur De Résonance Plasmonique	26
I.7.5 Photodétecteurs	27
I.7.6 Les Transistors	27
<i>a) Transistor Bipolaire à Hétérojonction</i>	27
<i>b) Transistors à Haute Mobilité Électronique HEMT</i>	28
I.8 Conclusions	29

## ***Chapitre II : PROPRIÉTÉS ÉLASTIQUES DES MATÉRIAUX GaAs, AlAs ET LEURS ALLIAGES TERNAIRES $Al_xGa_{1-x}As$***

---

II.1 Introduction	31
II.2 Élasticité des Matériaux	33
II.2.1 Paramètres Élastiques	33
<i>a) Constantes Élastiques</i>	33
<i>b) Modules Élastiques</i>	34
II.2.2 Expressions des Modules Élastiques du Composé $Al_xGa_{1-x}As$	35
II.3 Théorie de Base et Formulation	36
II.3.1 Coefficient de Réflexion	36
II.3.2 Signature Acoustique	36

II.4 Méthodologie	37
II.4.1 Procédure	37
II.4.2 Détermination des Vitesses	38
II.4.3 Conditions de Simulation	39
II.5 Propriétés Élastiques du GaAs	39
II.5.1 Coefficient de Réflexion	39
II.5.2 Signature Acoustique	41
II.5.3 Spectres FFT	41
II.6 Propriétés Élastiques d'AlAs	42
II.6.1 Coefficient de Réflexion	42
II.6.2 Signature Acoustique	43
II.6.3 Spectres FFT	43
II.6.4 Étude Comparative des Propriétés Acoustiques des Matériaux Binaires GaAs et AlAs	45
II.7 Influence de la Fraction d'Al et Propriétés de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	46
II.8 Influence de la Fraction d'Al sur le Coefficient de Réflexion	47
II.8.1 Étude de la Fonction Complexe $R(\theta)$	47
II.8.2 Influence sur les Angles Critiques	49
II.9 Effets de la Fraction d'Al sur les Signatures Acoustiques	50
II.9.1 Mise en Évidence	50
II.9.2 Variation de la Période Spatiale	50
II.10 Influence de la Fraction d'Al sur les Vitesses des SAWs	52
II.10.1 Vitesse de Rayleigh	52
II.10.2 Vitesse des Ondes Longitudinales	54
II.10.3 Quantification	55
II.11 Conclusions	56

## **Chapitre III : INFLUENCE DE L'ANISOTROPIE SUR LES PROPRIÉTÉS ACOUSTIQUES DES COMPOSÉS GaAs, AlAs, ET $Al_xGa_{1-x}As$**

---

III.1 Introduction	59
III.2 Anisotropie	60
III.3 Influence de l'Anisotropie sur les Propriétés du GaAs	61
III.3.1 Coefficient de Réflexion	61
III.3.2 Signatures Acoustiques et leurs spectres FFT	63
III.4 Influence de l'Anisotropie sur les Propriétés de l'AlAs	65
III.4.1 Effet de l'Anisotropie sur $R(\theta)$	65
III.4.2 Effet de l'Anisotropie sur les $V(z)$	67
III.4.3 Effet de l'Anisotropie sur les Spectres FFT	68
III.5 Généralisation au Composé $Al_xGa_{1-x}As$	69
III.5.1 Effet de l'Anisotropie sur le Coefficient de Réflexion	69
III.5.2 Effet de l'Anisotropie sur les Signatures Acoustiques $V(z)$	69
III.5.3 Effet de l'Anisotropie sur les Spectres FFT	71
III.6 Analyse et Quantifications de l'Effet de l'Anisotropie	74
III.6.1 Période Spatiale	74
III.6.2 Vitesse de Rayleigh	75
III.6.3 Angles Critiques	77
III.7 Application au Composé $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$	79
II.7.1 Coefficient de Réflexion	79
II.7.2 Signatures Acoustiques et Spectres FFT	81
III.8 Étude du Phénomène de Dispersion	83
III.8.1 Procédure de Calcul	83
III.8.2 Dispersion de $V_R$ dans la Structure $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$	84

III.8.3 Dispersion de $\Delta z$ et des $\theta_R$ dans la Structure Al <sub>0.4</sub> Ga <sub>0.6</sub> As/GaA	86
III.9 Conclusion	88
Conclusion Générale	89
Références Bibliographiques	92

# Liste des figures

## Chapitre I

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Figure I.1</b>	Structure cristalline du GaAs Zinc blende	<b>10</b>
<b>Figure I.2</b>	Maille élémentaire cubique de l'alliage $A_xB_{1-x}C$ pour différentes fraction molaire	<b>14</b>
<b>Figure I.3</b>	Variation du paramètre du réseau $a$ en fonction de la concentration d'Al pour l'alliage $Al_xGa_{1-x}As$ à 300 K	<b>16</b>
<b>Figure I.4</b>	Représentation du gap d'énergie: A) gap indirect et B) gap direct	<b>19</b>
<b>Figure I.5</b>	Gap d'énergie de l'alliage $Al_xGa_{1-x}As$ en fonction de la fraction d'Al $x$ à 300 K	<b>20</b>
<b>Figure I.6</b>	Diagramme de bandes d'énergie de deux matériaux de gap différents (AlGaAs et GaAs)	<b>21</b>
<b>Figure I.7</b>	Diagramme des bandes d'énergie d'une hétérojonction à l'équilibre	<b>21</b>
<b>Figure I.8</b>	Cellule solaire tandem de structure AlGaAs/SiGe	<b>25</b>
<b>Figure I.9</b>	Schéma de capteur à résonance plasmonique de surface	<b>26</b>
<b>Figure I.10</b>	Structure HEBT à puits quantique	<b>28</b>
<b>Figure I.11</b>	Structure de HEMT à base de GaAs	<b>29</b>

## Chapitre II

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Figure II.1</b>	Coefficient de réflexion $R(\theta)$ du GaAs	<b>40</b>
<b>Figure II.2</b>	Signatures acoustiques du composé GaAs	<b>41</b>
<b>Figure II.3</b>	Spectre de FFT du composé GaAs	<b>42</b>
<b>Figure II.4</b>	Coefficient de réflexion $R(\theta)$ de AlAs	<b>43</b>
<b>Figure II.5</b>	Signatures acoustiques du composé AlAs	<b>44</b>

<b>Figure II.6</b>	Spectres FFT du composé AlAs	<b>44</b>
<b>Figure II.7</b>	Signatures acoustiques et leurs spectres FFT des composés GaAs et AlAs	<b>45</b>
<b>Figure II.8</b>	Variation de l'amplitude (a) et de la phase (b) du coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence pour la structure $Al_xGa_{1-x}As$ pour $0 \leq x \leq 1$	<b>48</b>
<b>Figure II.9</b>	Signatures acoustiques (a) et spectres FFT (b) du composé $Al_xGa_{1-x}As$ à différentes fraction d'Al	<b>51</b>
<b>Figure II.10</b>	Évolution de la Vitesse de Rayleigh en fonction de la fraction d'Al du composé $Al_xGa_{1-x}As$	<b>53</b>
<b>Figure II.11</b>	Vitesse longitudinale du composé $Al_xGa_{1-x}As$ à différentes fraction d'Al	<b>54</b>
<b>Figure II.12</b>	Variation des modules de Young et de cisaillement en fonction de la fraction d'Al de la structure $Al_xGa_{1-x}As$ .	<b>55</b>

### Chapitre III

<b>Figure</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Figure III.1</b>	Amplitudes et phase des coefficients de réflexion pour le GaAs en fonction d'angle d'incidence pour différentes orientations cristallographiques	<b>62</b>
<b>Figure III.2</b>	Effet de l'anisotropie sur les signatures acoustiques du GaAs suivant les directions cristallographiques [100], [110] et [111]	<b>64</b>
<b>Figure III.3</b>	Spectres FFT à différentes directions [111], [100], et [110] du binaire GaAs	<b>63</b>
<b>Figure III.4</b>	Amplitudes et phases des coefficients de réflexion pour l'AlAs en fonction de l'angle d'incidence pour différentes orientations	<b>66</b>
<b>Figure III.5</b>	Variation des signatures acoustiques de l'AlAs en fonction de la direction cristallographique [100], [110], et [111]	<b>67</b>
<b>Figure III.6</b>	Spectres FFT du binaire AlAs à différentes directions cristallographiques [111], [100] et [110]	<b>68</b>
<b>Figure III.7</b>	Coefficient de réflexions obtenues à différents directions cristallographiques pour certaine fraction d'Al de la structure $Al_xGa_{1-x}As$	<b>70</b>
<b>Figure III.8</b>	Signatures acoustiques obtenues à différents directions cristallographiques pour certaine fraction d'Al de la structure $Al_xGa_{1-x}As$	<b>72</b>
<b>Figure III.9</b>	Spectre de FFT obtenu à partir de la courbe $V(z)$ de la structure $Al_xGa_{1-x}As$ à différent directions	<b>73</b>

<b>Figure III.10</b>	Périodes Spatiales $\Delta z$ en fonction de la fraction d'Al dans les directions [111], [100], et [110] de la structure $Al_xGa_{1-x}As$	<b>74</b>
<b>Figure III.11</b>	Évolution de la vitesse de Rayleigh $V_R$ en fonction de la fraction d'Al selon les trois directions cristallographiques [111], [100] et [110]	<b>76</b>
<b>Figure III.12</b>	Variation des angles critiques de l' $Al_xGa_{1-x}As$ pour les directions [111], [100], et [110]	<b>78</b>
<b>Figure III.13</b>	Amplitudes et phases des coefficients de réflexion de la structure $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ pour différentes orientations	<b>80</b>
<b>Figure III.14</b>	Signatures acoustiques du composé $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ pour différents directions [100], [110] et [111]	<b>81</b>
<b>Figure III.15</b>	Superpositions des $V(z)$ et leurs spectres FFT du composé $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ pour les différentes directions	<b>82</b>
<b>Figure III.16</b>	Courbes de dispersion de la vitesse de Rayleigh en fonction de l'épaisseur de la couche normalisée, $d/\lambda_T$ , de la structure $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$	<b>85</b>
<b>Figure III.17</b>	Influence de l'épaisseur $d/\lambda_T$ sur la période $\Delta z$ et les angles critiques $\theta_R$ à différents directions de la structure $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$ .	<b>87</b>

# Liste des Tableaux

## Chapitre I

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau I.1</b>	Extrait de la classification périodique des éléments du groupe III et V	<b>07</b>
<b>Tableau I.2</b>	Paramètre de maille cubique à 300°K	<b>09</b>
<b>Tableau I.3</b>	Paramètres de bases de l'alliage $Al_xGa_{1-x}As$ en fonction de la fraction d'Al à 300 K	<b>17</b>

## Chapitre II

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau II.1</b>	Constantes élastiques des matériaux GaAs, AlAs et $Al_xGa_{1-x}As$ à 300 k	<b>34</b>
<b>Tableau II.2</b>	Caractéristiques des deux binaires GaAs et AlAs	<b>46</b>
<b>Tableau II.3</b>	Angles critiques de la structure $Al_xGa_{1-x}As$	<b>49</b>
<b>Tableau II.4</b>	Valeurs de $\Delta z$ du mode longitudinal et celui de Rayleigh en fonction de la fraction d'Al de la structure $Al_xGa_{1-x}As$	<b>52</b>

## Chapitre III

<b>Tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Tableau III.1</b>	Angles Critiques du GaAs pour différentes directions cristallographiques	<b>63</b>
<b>Tableau III.2</b>	Angles Critiques du AlAs pour différent directions cristallographiques	<b>66</b>
<b>Tableau III.3</b>	Valeurs des constantes polynomiales de la période spatiale	<b>75</b>
<b>Tableau III.4</b>	Valeurs des constantes polynomiales de vitesse de Rayleigh de la structure $Al_xGa_{1-x}As$ .	<b>77</b>



<b>Tableau III.5</b>	Angles critiques pour chaque direction cristallographique d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ pour la fraction d'Al $0 \leq x \leq 1$	<b>77</b>
<b>Tableau III.6</b>	Équations caractéristiques des variations des angles critiques d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	<b>79</b>
<b>Tableau III.7</b>	Angles critiqués des modes longitudinal, transversal et de Rayleigh de la structure $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$	<b>81</b>
<b>Tableau III.8</b>	Vitesses de saturation de la structure $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$ pour les directions [100] et [110] du substrat	<b>86</b>

# Liste des Symboles

<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>
<b>a</b>	Paramètre de maille du matériau, ou a constante de réseau
<b>A</b>	Facteur d'Anisotropie élastique de « Zener »
<b>B</b>	Module de Compressibilité
<b>C<sub>ij</sub></b>	les constantes élastiques
<b>d</b>	L'épaisseur de la couche
<b>E<sub>g</sub></b>	Energie de gap
<b>E<sub>c1</sub></b>	L'énergie de bande de conduction du matériau
<b>E<sub>v</sub></b>	L'énergie de bande de valence du matériau
<b>E<sub>F</sub></b>	L'énergie de niveau de Fermi du matériau
<b>E</b>	Module de Young
<b>f</b>	Fréquence de fonctionnement
<b>FFT</b>	Transformée de Fourier Rapide
<b>G</b>	Module de Cisaillement
<b>K</b>	Nombre d'ondes sur le diagramme E(K)
<b>P<sup>2</sup>(θ)</b>	La fonction pupille de la lentille
<b>R(θ)</b>	Coefficient de réflexion
<b>  R(θ)  </b>	Module du coefficient de réflexion
<b>SAM</b>	Microscopie acoustique
<b>SAW</b>	Surface acoustique wave
<b>V<sub>d</sub></b>	La tension de diffusion
<b>V<sub>L</sub></b>	Vitesse longitudinale du matériau
<b>V<sub>T</sub></b>	Vitesse transversale du matériau
<b>V<sub>liq</sub></b>	la vitesse de propagation des ondes dans le liquide
<b>V(z)</b>	Signature acoustique d'un matériau

$V_{\text{lens}}(z)$	La réponse de lentille
$V_{\text{sample}}$	La réponse réelle de l'échantillon
$x, y$	Fractions molaires
$z$	Distance de défocalisation
$Z$	Impédance acoustique
$Z_{\text{sol}}$	Impédances acoustiques du solide
$Z_{\text{liq}}$	Impédances acoustiques du liquide

### *Symboles Grecques*

$\epsilon_{ij}$	Le tenseur des déformations
$\theta$	L'angle entre un vecteur d'onde ( $k$ ) et l'axe de la lentille ( $z$ )
$\theta_i$	Angle D'incidence
$\theta_R$	Angle critique d'excitation du mode Rayleigh
$\theta_L$	Angle critique d'excitation du mode longitudinale
$\theta_T$	Angle critique d'excitation du mode transversale
$\lambda$	Longueur d'onde
$\lambda_T$	La longueur d'onde transversale de la couche
$\rho$	Densité
$\rho_{\text{so}}$	la densité du solide
$\rho_{\text{liq}}$	la densité du liquide de couplage
$\phi$	Phase du coefficient de réflexion
$\sigma$	Coefficient de Poisson
$\sigma_{ij}$	Le tenseur des contraintes.
$\Delta z$	Période spatiale
$\Delta E_c$	Différence d'énergie des bandes de conduction
$\Delta E_v$	Différence d'énergie des bandes de valence
$\Delta \phi$	Déphasage du coefficient de réflexion
$\Phi$	travail de sortie du matériau
$\chi$	Affinité électronique

# ***INTRODUCTION GENERALE***

---

Les composés semi-conducteurs III-V, telle que le GaAs, AlAs, InP, GaN, etc. forment le noyau des sources lumineuse à semi-conducteurs et des dispositifs électroniques et optoélectroniques de puissance en raison de leur propriétés remarquables. En effet, ils présentent généralement une haute mobilité électronique et une bande interdite directe, leur conductivité thermique élevée, un taux de saturation électronique élevé, un champ de claquage élevé, une forte capacité à résister au rayonnement et d'autres performances incomparables [1-4]. De ce fait, ils sont utilisés dans des applications hyperfréquences optoélectroniques telles que les diodes électroluminescentes DEL, ultraviolettes UV, et infrarouges IR, les cellules solaires, ainsi que dans les applications électroniques (transistors) [5-10].

Notons qu'après le silicium, ce sont les deuxièmes matériaux semi-conducteurs les plus utilisés dans l'industrie [1, 11]. Ils constituent un domaine technologique très attractif qui est dû à la possibilité de produire de nouveaux matériaux avec des propriétés ajustables. Aussi, un large nombre de dispositifs sont fabriquée sur la base de la structure  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ . L'avantage de ces systèmes réside dans le fait que leurs propriétés sont modifiées en changeant leurs paramètres structuraux, notamment la largeur du gap et la composition [2-3, 12-13]. En plus, grâce à leur structure de bande transformée en mini-bandes par effet tunnel résonnant, les porteurs excités du système sont mieux protégés contre les relaxations par les phonons optiques considérés comme des éléments réducteurs de la transmission électronique.

Notamment, l'amélioration des performances des dispositifs électroniques et optoélectroniques dans différents domaines d'applications est un enjeu majeur de l'industrie actuelle. En effet, la connaissance de différentes propriétés des semi-conducteurs est pertinente dans la conception et le développement de différents dispositifs qui font la promotion de la technologie. Quant aux propriétés élastiques sont liées à divers phénomènes fondamentaux de l'état solide tels que l'équation d'état, le potentiel interatomique et les spectres de phonons. De même, ces propriétés sont également liées thermodynamiquement à la chaleur spécifique, à la température de Debye, à la dilatation thermique, au point de fusion, etc. [14-16].

Par ailleurs, toute utilisation spécifique d'un matériau dans l'industrie technologique nécessite une information sur ses caractéristiques mécaniques [17]. Particulièrement, le CND (Contrôle Non Destructive) est une technique essentielle dans les stratégies de maintenance et de contrôle des structures, composants critiques et installations industrielles. L'un des avantages les plus significatifs des CND est qu'ils peuvent être réalisés à toutes les étapes des productions, même lors de leur élaboration [18-19]. Le CND ne se limite pas seulement au contrôle dans les sciences des matériaux mais, il s'étend également à d'autres domaines tels qu'en géologie, biologie ou en médecine.

En fait, la microscopie acoustique à balayage (Scanning Acoustic Microscopy, SAM) est une technique de mesure non destructive qui peut être utilisée pour imager les caractéristiques internes de la gamme micron et sous-micron d'un échantillon fournissant des résultats fiables et précis. C'est l'application haute de gamme des techniques

ultrasonores pour une caractérisation qualitative (imagerie) et quantitative (microanalyse), qui utilisant les ondes ultrasonores est basée sur la propagation des ondes élastiques dans la matière pour détecter et identifier les décollements internes, les vides, les microfissures, les changements de densité des matériaux, les défauts et de nombreuses autres inhomogénéités dans les dispositifs, les matériaux et les assemblages [20-23]. Et contrairement aux techniques de rayons x, il est sensible non seulement aux variations de densité mais aussi aux propriétés élastiques.

Généralement, les propriétés élastiques des solides sont très importantes, car leur mesure donne des informations sur les forces qui agissent entre les atomes constitutifs d'un solide. Ceci est d'une grande importance pour interpréter et comprendre la nature de la liaison dans les solides et la nature de la technique non destructive [14, 24]. De ce fait, les propriétés élastiques sont adaptées pour décrire la structure des matériaux en fonction de sa composition [25].

Dans ce contexte, nous avons synthétisée par la détermination et l'optimisation des propriétés élastiques des matériaux semi-conducteurs III-V, GaAs, AlAs, et le ternaire  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , par une simulation théorique via le microscope acoustique à balayage, SAM, fonctionne en mode de réflexion dans les conditions de fonctionnement normales qui favorise l'excitation de mode de Rayleigh.

L'objectifs principaux dans ce travail sont ; (i) l'étude du comportement élastique des matériaux GaAs, AlAs, et du ternaire  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  puis, la détermination de la dépendance de la fraction d'Al,  $x$ , sur les propriétés élastiques des alliages semi-conducteurs AlAs et GaAs telle que  $0 \leq x \leq 1$ . (ii) déterminée l'influence de l'anisotropie sur les propriétés acoustiques des composés GaAs, AlAs, et la structure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . (iii) déterminée les courbes de dispersion de la vitesse de mode de Rayleigh  $V_R$ ,  $\Delta z$ , et  $\theta_R$ , de la structure  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$  pour différentes directions cristallographiques [100], [110], et [111] de la couche et celle du substrat, en fonction de l'épaisseur normalisée de la couche  $d/\lambda_T$ .

Cette thèse est composée de trois chapitres. Après une introduction générale, nous rappellerons les notions générales sur les matériaux semi-conducteurs III-V, particulièrement GaAs, AlAs, et leurs alliages ternaires  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , qui présentent une classe spéciale des matériaux. Nous présentons les différentes propriétés qui les rendent de

bons candidats pour les applications technologiques telle que: la diode, cellule solaire, réseaux nano fils, capteur, photodétecteurs et les transistors.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons notre problématique, en se basant sur l'étude de la micro-caractérisation non destructive, NDT, via la microscopie acoustique à balayage, SAM. Afin de comprendre ce comportement, il est important de connaître leurs propriétés élastiques. Pour atteindre cet objectif, nous étudions les propriétés élastiques des matériaux GaAs, AlAs, et leurs alliages ternaires  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Nous déterminons leurs coefficients de réflexion  $R(\theta)$ , signatures acoustiques  $V(z)$ , spectres de FFT, période spatiale,  $\Delta z$ , angles critiques des modes longitudinales,  $\theta_L$ , transversales,  $\theta_T$ , et de Rayleigh,  $\theta_R$ , ainsi les vitesses des modes longitudinales  $V_L$ , et de Rayleigh  $V_R$ , puis, en met en évidence la dépendance de la fraction d'Al,  $x$ , sur ces paramètres acoustiques telle que,  $0 \leq x \leq 1$ .

Enfin, dans le troisième chapitre, nous abordons l'étude de l'effet de l'anisotropie sur les paramètres acoustiques ( $R(\theta)$ ,  $V(z)$ , spectres de FFT, période spatiale, angles critiques, vitesses de mode de Rayleigh  $V_R$ ) des matériaux GaAs, AlAs, et  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Aussi, nous déterminons l'influence de l'anisotropie sur les courbes de dispersion des vitesses du mode de Rayleigh,  $\Delta z$ , et de  $\theta_R$  pour la structure  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$  en fonction de l'épaisseur normalisée  $d/\lambda_T$  de la couche pour différentes orientations cristallographiques [100], [110], et [111].

Nous terminerons cette étude par une conclusion générale qui regroupe les résultats les plus importants.

***CHAPITRE I***  
***SEMI-CONDUCTEURS III-V ET LEURS***  
***APPLICATIONS***

---



## I.1 Introduction

De nombreuses technologies avancées sont rendues possibles grâce aux semi-conducteurs qui trouvent leurs applications dans de nombreux composants tels que: les cellules solaires à haut rendement, la cellule solaire multi-jonction, MJ [1-2], les diodes électroluminescentes, LED [3], les transistors [4-5], les circuits intégrés, IC [6], les lasers multi-puits quantiques [7], les photo-détecteurs, PD [8], les guides d'ondes [9], etc. Ils constituent également une excellente plate-forme pour l'étude des principes physiques tels que la mécanique quantique [10-12]. Ces applications couvrent aussi les équipements aussi bien médicaux et spatiaux que de télécommunications. Notons que cette dernière application a motivé récemment de nombreux chercheurs [6, 10, 13].

Les semi-conducteurs composés sont classés selon le nombre d'éléments les constituant en: semi-conducteurs binaires, ternaires, quaternaires et même quinaires. Ces alliages peuvent être élaborés à l'aide de diverses techniques telles celles de croissance épitaxiale: l'épitaxie en phase vapeur, VPE, l'épitaxie par jets moléculaire, MBE, le dépôt chimique en phase vapeur organique métallique, MOCVD, et l'épitaxie van der Waals, VDW [14-15].

Ces semi-conducteurs composés ont l'avantage de choisir les propriétés appropriées d'un matériau en sélectionnant les fractions molaires désirées. Aussi, ils ont la capacité de s'adapter à de nombreuses technologies différentes. La raison pour laquelle ces semi-conducteurs composés sont plus couramment utilisés. Par exemple, il est bien établi que le nombre d'électrons dans la bande de conduction peut être augmenté en dopant les semi-conducteurs, ce qui permet d'ajuster régulièrement la densité d'électrons, propriété utile dans les composants électroniques comme les transistors. Mais, il est également possible de combiner des semi-conducteurs avec différentes bandes interdites pour obtenir des hétérostructures ou des composés permettant d'ajuster la largeur de la bande interdite [16-17]. En outre, les composés à base d'aluminium sont des matériaux électroniques et optoélectroniques des plus importants en raison de leur incorporation fréquente dans les hétérostructures [18-21].

D'autre part, les semi-conducteurs composés peuvent facilement former des alliages semi-conducteurs aux propriétés adaptées, ceci est principalement dû à leur similarité chimique et leur structure cristalline semblable. En effet, les compositions ordonnées à travers la formation des alliages semi-conducteurs permettent de concevoir de nouvelles structures de matériaux. Cela permet le fonctionnement dans des plages

spectrales souhaitables et donne accès à d'importants effets quantiques au sein du dispositif [22-24]. Notamment, l'incorporation de l'aluminium dans des alliages des semi-conducteurs offre des possibilités plus diverses d'obtenir les propriétés électroniques souhaitées pour un nouveau dispositif électronique [25].

Couramment, la plupart des dispositifs électroniques et optoélectroniques de haute puissance qui peuvent être utilisés dans des conditions spécifiques dans les systèmes modernes de contrôle et de conversion sont basés sur des matériaux semi-conducteurs III-V qui sont connus par leurs propriétés physiques attirantes. Nous citons par exemple les composés binaires tels que: l'arséniure de gallium, GaAs, le phosphore d'indium, InP, etc. et les ternaires comme : l'arséniure d'aluminium et de gallium, AlGaAs, l'arséniure d'indium et de gallium, InGaAs, etc. dont les propriétés sont très intéressantes.

Dans ce chapitre nous donnons quelques notions relatives aux semi-conducteurs III-V, suivies par un rappel sur leurs propriétés structurales. Ensuite, nous décrivons certains concepts des hétérostructures à base du système AlGaAs/GaAs. Enfin, les effets de la fraction d'aluminium sur divers paramètres de la structure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  sont abordés.

## I.2 Semi-conducteurs Composés III-V

Les semi-conducteurs composés III-V sont des matériaux formés à partir d'un élément de la III<sup>ème</sup> colonne et un autre de la V<sup>ème</sup> colonne de la classification périodique de Mendeleïev. Parmi ces composés l'arséniure de gallium, GaAs, le carbure de silicium, SiC, le nitrure de gallium, GaN, l'arséniure d'aluminium, AlAs, l'antimonide d'aluminium AlSb, le phosphore d'indium, InP, et l'oxyde de zinc, ZnO, sont les plus couramment utilisés. Mais de nombreuses autres combinaisons existent avec des propriétés de matériau différentes. Le tableau (I.1) regroupe quelques éléments des groupes III et V.

<b>Éléments du groupe III</b>	<b>Boron <sup>5</sup>B</b>	<b>Aluminium <sup>13</sup>Al</b>	<b>Gallium <sup>31</sup>Ga</b>	<b>Indium <sup>49</sup>In</b>
<b>Éléments du groupe V</b>	<b>Nitrogen <sup>7</sup>N</b>	<b>Phosphorus <sup>15</sup>P</b>	<b>Arsenic <sup>33</sup>As</b>	<b>Antimony <sup>51</sup>Sb</b>

*Tableau I.1 Extrait de la classification périodique des éléments du groupe III et V.*

Les semi-conducteurs composés ont des propriétés polyvalentes, ils présentent un grand intérêt notamment dans l'électronique, l'optoélectronique et en microélectronique dans la fabrication des dispositifs innovants [26-28]. Aussi, leurs alliages forment une classe de matériaux riches qui a conduit à la fabrication de dispositifs de bonnes performances. La gamme de compositions de matériaux offerte par la formation de systèmes d'alliages ternaires, qui permet la conception de nouvelles structures de matériaux dans lesquelles des propriétés critiques telles que la bande interdite, le paramètre de réseau et les discontinuités de la bande d'hétérojonction peuvent être choisis de manière presque indépendante. Ces matériaux permettent d'accéder à des effets quantiques intéressants et importants au sein du dispositif [29].

Une des caractéristiques importantes de ces composés réside dans le fait que leur gap d'énergie,  $E_g$ , est supérieur à 1 eV et inférieur à 3 eV; ce qui permet une absorption et une émission efficace de la lumière [22]. Notons que, ceux possédant un large gap sont mieux adaptés pour des applications en diodes lasers opérant dans la région du spectre visible. Par contre ceux à petite bande interdite sont utilisés dans la fabrication des détecteurs infrarouges.

Il est prévu que ces composés peuvent fournir de nouveaux composés III-V avec des caractéristiques attirantes et des propriétés importantes dans la fabrication de divers dispositifs électroniques et optiques intéressantes [19, 22]. Par exemple, l'arséniure d'aluminium et de gallium, AlGaAs, est généralement écrit comme  $Al_xGa_{1-x}As$  et le phosphore d'arséniure et de gallium, GaAsP, est généralement écrit  $GaAs_{1-x}P_x$ .

### I.3 Propriétés Structurales des Composés III-V

Les semi-conducteurs III-V tels que GaAs, AlAs, AlSb, etc. Ont une structure cristallographique de type Blende de zinc. Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant (Si, Ge, etc.), est constituée de deux sous-réseaux cubiques à faces centrées, l'un d'éléments III, l'autre d'éléments V, décalé l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale. Comme présenté dans la figure I.1, la maille élémentaire comporte deux atomes, le premier (Ga) à l'origine et l'autre (As) à  $(a/4, a/4, a/4)$ , où,  $a$ , indique le paramètre de maille du matériau. Du fait que les deux sous-réseaux cubiques à faces centrées sont décalés, le cristal n'est pas centro-symétrique. Il en découle des propriétés physiques différentes suivant les directions cristallographiques considérées [30].

Le réseau est alors entièrement défini par une seule grandeur qui la constante du réseau ou le paramètre de maille,  $a$ . Le tableau (I.2) récapitule les valeurs de  $a$  pour les semi-conducteurs III-V. Quant aux liaisons atomiques, elles ne sont pas simplement covalentes comme dans le cas du silicium. Elles reposent sur le transfert d'électrons des atomes du groupe V sur ceux du groupe III.

Composés	GaAs	AlAs	InP	GaP	InAs	GaSb	InSb	AlSb
$a$ (Å)	5.6533	5.6611	5.8687	5.4505	6.0583	6.0960	6.4790	6.1355

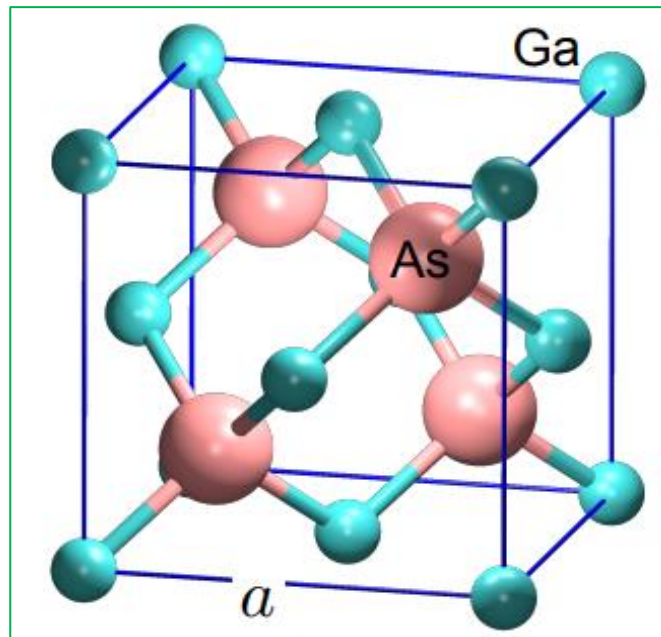
Tableau I.2 Paramètre de maille cubique à 300 °K [30].

### I.3.1 Arséniure de Gallium

#### a) Structure

Le GaAs appartient au groupe des semi-conducteurs III–V, il cristallise dans la structure Zinc Blende. Dans un réseau parfait, chaque atome de Ga est entouré de quatre atomes d'As et chaque atome d'As est entouré de quatre atomes de Ga. Le cristal se construit avec les ions  $\text{Ga}^-$  et  $\text{As}^+$  qui ont tous quatre électrons périphériques. Cette répartition est à l'origine du caractère partiellement ionique et partiellement covalent des liaisons (semi-conducteurs polaires) qui sont orientées dans l'espace suivant les axes de symétrie d'un tétraèdre régulier. Cette propriété est en particulier responsable de l'anisotropie optique dans les semi-conductrices III-V qui a été mise en évidence expérimentalement par « Krebs et Voisin » [31].

La cellule unitaire du réseau Zinc Blende est montrée dans la figure I.1, il est bien illustré que les atomes d'As et de Ga reposent sur deux sous-réseaux cubiques à faces centrées identiques (C.F.C), qui s'interpénètrent et sont décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la grande diagonale le long de celle-ci. Alors que la liaison dans le Si et Ge est strictement covalente, tant que, la liaison GaAs a une composante ionique importante.



**Figure I.1** Structure cristalline du GaAs Zinc blende [32]

Par ailleurs, le GaAs a plusieurs phases et cristallise, dans les conditions ambiantes, dans la phase de mélange de zinc cubique (B3). Sous pression, la phase de mélange de zinc peut se transformer en phase de chlorure de sodium (B1) [33]. Le GaAs a des propriétés physiques important, y compris un coefficient de dilatation thermique élevé  $6.4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , une densité de  $5.36 \text{ g/cm}^3$ , et des points de fusion élevés de  $1238 \text{ C}^\circ$ .

### ***b) Propriétés du GaAs***

Le GaAs a été reconnu depuis longtemps comme étant un matériau très favorable dans les applications, photodiodes, photovoltaïques et optoélectronique en raison de son utilisation technologique polyvalente et de la souplesse de ses propriétés physiques via l'ingénierie structurale. Cette faveur peut être attribuée à la grande mobilité de ses électrons, à son gap direct et au bon contrôle de ses mécanismes de croissance [34]. Le GaAs est devenu rapidement un système de référence pour les cellules solaires à couche mince et il est couramment utilisé comme substrat pour la croissance épitaxiale d'autres composés III-V tels que l'arséniure d'aluminium et de gallium  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  et l'arséniure d'indium et de gallium  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  [35-36].

### I.3.2 Arséniure d'Aluminium

#### a) Structure

Du point de vue cristallographique et dans les conditions normales, l'AlAs, se cristallise dans la structure Zinc-Blende, B3. Dans ce cristal, chaque atome d'arsenic As est entouré de quatre atomes d'aluminium Al, et chaque atome d'aluminium est entouré de quatre atomes d'arsenic. Il se produit alors un échange d'électrons, le cristal se construit avec les ions  $Al^-$  et  $As^+$ , qui ont tous quatre électrons périphériques. Suite à l'application d'une pression, il subit une transition structurale à la structure NaCl, B1, ou NiAs, B8 [37].

#### b) Propriétés de AlAs

Dans les conditions ambiantes, l'arséniure d'aluminium est stable avec un gap d'énergie indirect. De plus, l'AlAs possède de bonnes caractéristiques physiques: un coefficient de dilatation thermique élevé  $5,20 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ , une densité de  $3.76 g/cm^3$ , une conductivité thermique  $0,9 W/cm K$  et un point de fusion élevés  $2013 K$  [38].

Par ailleurs, le calcul des structures de bande électronique montre que les trois polymorphes d'AlAs (oC12-AlAs, hP6-AlAs et cI24-AlAs) récemment découverts sont des semi-conducteurs avec des écarts plus petits que ceux de Zinc-Blende AlAs. oC12-AlAs et hP6-AlAs sont tous deux des semi-conducteurs indirects avec des bandes interdites respectivement égale à  $0,468 eV$  et  $1,356 eV$ . Alors que cI24-AlAs est un semi-conducteur à gap direct avec une valeur de  $1,761 eV$  [39].

Ainsi, l'arséniure d'aluminium est un semi-conducteur avec presque la même constante de réseau que l'arséniure de gallium, donc il peut former un super-réseau  $Al_xGa_{1-x}As$  avec le GaAs; les couches ont très peu de contrainte induite, ce qui leur permet de devenir presque arbitrairement épaisses. Cela permet une mobilité électronique, et rend le matériau intéressant pour la fabrication de dispositifs électroniques et optoélectroniques élevée extrêmement performants comme les transistors HEMT et d'autres dispositifs à puits quantiques, en raison de son incorporation fréquente dans les hétérostructures à base de GaAs [40].

### I.4 Alliage Ternaires des Semi-conducteurs III-V

L'intérêt pratique des semi-conducteurs III-V est considérablement consolidé par la possibilité de réaliser des alliages par substitution partielle de l'un des éléments par un autre de la même colonne pour obtenir des alliages ternaires identifiés de la façon suivante:  $A_xA'_{(1-x)}B$ . Ces alliages, qui sont des solutions solides de deux ou plusieurs éléments

semi-conducteurs, sont caractérisés par la présence de la fraction molaire,  $x$ . Ces dernières années, ils sont devenus importants et d'un grand intérêt pour des applications technologiques; comme ils font l'objet de nombreuses recherches, notamment dans la fabrication des dispositifs électroniques et optoélectroniques [18-21].

En fait, l'une des meilleures manières de changer les propriétés électroniques et optiques des semi-conducteurs, est en formant leurs alliages. Il est alors intéressant de combiner deux ou plusieurs composés avec différents gaps énergétiques et différentes rigidités afin d'obtenir un nouveau matériau avec des propriétés intermédiaires [17]. Autrement dit, obtenir les propriétés désirées dans divers domaines d'applications technologiques.

En effet, les alliages semi-conducteurs III–V sont des matériaux prometteurs pour de nombreuses applications technologiques. Ils constituent la base pour l'ingénierie des dispositifs électroniques à grande vitesse et des dispositifs optoélectroniques avancés [41-42].

#### **I.4.1 Définition d'un Alliage**

Un alliage désigne un mélange homogène de deux ou plusieurs matériaux. Un alliage semi-conducteur III-V, est constitué par les éléments des colonnes III et V de la classification périodique de type  $A_xB_{1-x}C$ . Notons qu'en générale les propriétés de la substance résultante sont sensiblement différentes de celles de ses composants. L'évolution des techniques modernes de la croissance cristalline et la purification des semi-conducteurs conduisent à la réalisation de plusieurs alliages binaires, ternaires et aussi quaternaires qui trouvent leur application dans différents domaines entraînant ainsi l'encouragement des chercheurs à développer aussi les modèles théoriques que l'expérimental.

#### **I.4.2 Classification des Alliages**

Les alliages semi-conducteurs sont classés selon leurs nombre de constituants, comme suit [43]:

- Alliage binaire de la forme AB
- Alliages ternaire  $AB_xC_{1-x}$  qui sont caractérisé par la fraction molaire,  $x$ . Ce paramètre permet de faire varier de façon continue les propriétés du matériau, en particulier le gap et le paramètre cristallin qui caractérise la dimension de la maille élémentaire du réseau. Le composé ternaire est obtenu à partir de la combinaison de

deux composés binaires AB et AC afin d'obtenir: (i) l'alliage ternaire anionique:  $AB_xC_{1-x}$  ou (ii) l'alliage ternaire cationique:  $A_xB_{1-x}C$ .

- Alliages quaternaire  $A_{1-x}B_xC_yD_{1-y}$ , ce type d'alliages semi-conducteurs fait intervenir quatre composés binaires et il est caractérisé par la présence de deux fractions molaires  $x$ , et  $y$ . On note deux familles de cet alliage: (i) les solutions quadratiques de la forme  $A_{1-x}B_xC_yD_{1-y}$  et (ii) les solutions triangulaires anioniques  $AB_xC_yD_{1-x-y}$  et cationiques  $A_xB_yC_{1-x-y}D$ .

Parmi les semi-conducteurs composés ternaires les plus usuels, nous citons les suivants:

- **Aluminium Gallium Antimonide** : De formule chimique  $Al_xGa_{1-x}Sb$ , c'est un matériau important utilisé dans l'électronique à grande vitesse couvrant la plage de 1,3 à 1,55  $\mu m$ , requise pour les systèmes de communication par fibre optique infrarouge [44].
- **Arséniure de gallium et d'indium** : De formule chimique  $Ga_{1-x}In_xAs$ , c'est un composant clé dans les régions actives des lasers infrarouges à haute vitesse, des dispositifs électroniques et des lasers à cascade quantique à longue longueur d'onde [45].
- **Indium arsenic antimonide** : De formule chimique  $InAsSb$ , de gap le plus faible parmi tous les semi-conducteurs III-V, avec des valeurs de 0,1 eV à température ambiante. Pour cette raison, c'est un matériau important pour une variété de dispositifs optoélectroniques à infrarouge moyen, y compris les lasers et les photodétecteurs [46].

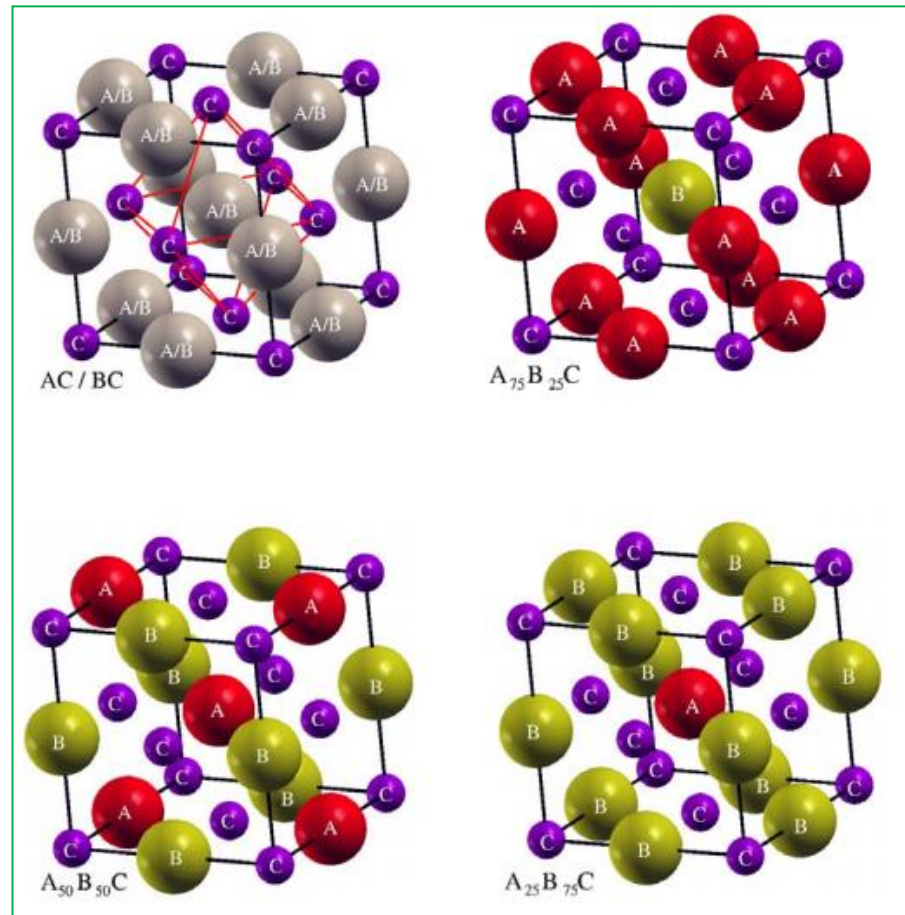
## I.5 Composé $Al_xGa_{1-x}As$

### I.5.1 Structure Cristalline

Tout le long de notre travail, nous nous sommes intéressés à l'alliage arséniure d'aluminium et de gallium,  $Al_xGa_{1-x}As$ , composé du GaAs et du AlAs avec une fraction molaire  $x$  en aluminium. Ce composé peut être obtenu en ajoutant de l'aluminium au processus de croissance du matériau GaAs [47]. Dans toute la plage des valeurs, de  $x = 0$  (GaAs) à  $x = 1$  (AlAs), l'AlGaAs a une constante de réseau similaire à celle du GaAs, tant que la variation de la constante de réseau entre les deux composés GaAs et AlAs reste inférieure à 1%, de sorte que les couches graduées peuvent être déposées sans formation de dislocations notables du réseau.



En effet, la maille du réseau figure I.2 joue un rôle essentiel dans la détermination des propriétés de l'alliage dont les deux composés le constituent, GaAs et AlAs, ont des mailles très rapprochées. Notons que la structure Zinc Blende d'AlGaAs, est la phase thermodynamiquement stable à basse température alors que la structure Wurtzite est plus



**Figure I.2:** Maille élémentaire cubique de l'alliage  $A_xB_{1-x}C$  pour différentes fraction molaire. [48]

stable à haute température. Si le GaAs cristallise dans la structure Zinc Blende, la structure cristalline de l'alliage  $Al_xGa_{1-x}As$  est plus compliquée. En effet, la distribution des atomes de Ga et d'Al, lors de la croissance par épitaxie, est aléatoire. Néanmoins dans la plupart des travaux, on suppose que l' $Al_xGa_{1-x}As$  a la même structure que le GaAs. De plus, le système d'alliage  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  est potentiellement d'une grande importance pour de nombreux composants électroniques et dispositifs optoélectroniques, du fait que la différence de paramètre de réseau entre le GaAs et  $Al_xGa_{1-x}As$  ( $0 < x < 1$ ) est très faible (moins de 0,15 % à 300 K), ce qui confirme une concentration d'états d'interface négligeable.

## I.5.2 Constante du Réseau

La possibilité de réaliser des alliages ternaires, quaternaires ou quasi binaires ouvre la possibilité de réaliser des matériaux dont la largeur de bande interdite, et donc les propriétés optiques, varient dans une très large gamme de longueurs d'onde. La constante de réseau, elle aussi, varie en fonction de la fraction  $x$  d'Al offrant plus de flexibilité dans le choix de tel ou tel matériau semi-conducteur pour une application donnée selon le domaine d'utilisation. La constante du réseau,  $a$ , obéit à la loi de « Vegard » [49], à l'exception de certains alliages. Il s'agit d'une moyenne pondérée linéairement en fonction de la composition  $x$  sur les constantes du réseau des composés binaires AC et BC formant l'alliage et donnée par:

$$a(x) = xa_{AC} + (1 - x)a_{BC} \quad (I.1)$$

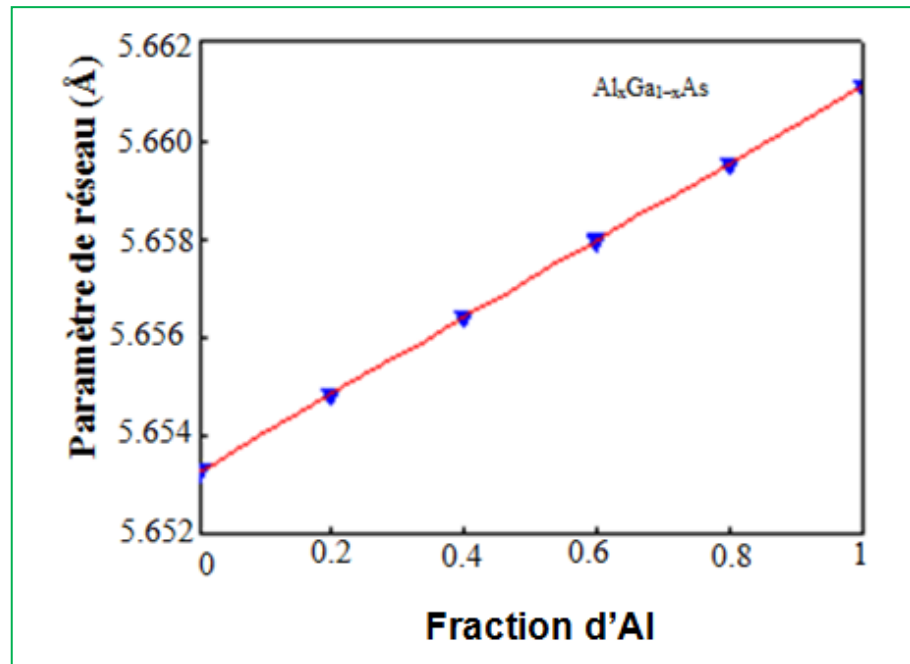
Avec,  $a_{AC}$  est le paramètre du réseau du composé binaire AC et  $a_{BC}$  est le paramètre du réseau du composé binaire BC. Dans le cas du composé  $Al_xGa_{1-x}As$ , la variation de la constante est décrite par la relation [50]:

$$a (\text{Å}) = 5.6533 + 0.0078 x \quad (I.2)$$

La figure I.3 représente l'évolution de paramètre de réseau,  $a$ , en fonction de la fraction d'aluminium,  $x$ , pour le composé  $Al_xGa_{1-x}As$ . On constate que la variation obéit bien à la loi de « Vegard ». De plus, pour  $x = 0$ , le paramètre de réseau  $a = 5.6533 \text{ Å}$  est celui du GaAs alors que pour  $x = 1$ , le paramètre de réseau  $a = 5.6611 \text{ Å}$  est celui de l'AlAs. La différence des paramètres de réseau entre le composé  $Al_xGa_{1-x}As$  et le GaAs peut aussi s'écrire : [30]

$$\frac{a(Al_xGa_{1-x}As) - a(GaAs)}{a(GaAs)} = 0.0013 x = 0.13 x \% \quad (I.3)$$

La variation d'autres paramètres cristallins et électriques du composé  $Al_xGa_{1-x}As$  en fonction de la fraction molaire  $x$ ; sont déterminées et résumés dans le tableau (I.3).



**Figure I.3** Variation du paramètre du réseau  $a$  en fonction de la fraction d'Al pour l'alliage  $Al_xGa_{1-x}As$  à 300 K.

### I.5.3 Propriétés de l' $Al_xGa_{1-x}As$

Ces dernières années, le ternaire  $Al_xGa_{1-x}As$  a attiré une attention particulière, en raison de ses propriétés importantes dans les dispositifs électroniques et optoélectroniques [5]. Avec le développement de la technologie surtout dans le domaine des puits quantiques [51], une importance remarquable a été accordée à la structure  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  particulièrement dans le domaine médicale, spatiale et de télécommunication [13,52]. Son importance réside dans le fait que son gap est ajustable sachant que, l'incorporation d'aluminium dans les composés III-V peut ouvrir des voies pour l'ingénierie souhaitée ce qui peut conduire à de nouveaux matériaux qui peuvent fournir des opportunités plus diversifiées [18-21].

La composition  $x = 0,2$  d' $Al_xGa_{1-x}As$  est choisie pour former l'hétérostructure à puits quantiques multiples, MQW, et pourrait fonctionner comme un photodétecteur absorbant spécifiquement l'onde lumineuse de  $0,76 \mu m$  ce qui confirme son utilité dans les biocapteurs photoniques et les scintillateurs à luminescence. Cependant, pour d'autres compositions, le système fonctionne comme un photoémetteur avec un bon gain optique [53].

Aussi, les capteurs à base d'arséniure de gallium et d'aluminium  $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$  présentent les avantages d'une sensibilité angulaire élevée, des largeurs de résonance étroites et d'une réflectance minimale faible, ce qui en fait un bien meilleur choix pour les applications bio-détection [52]. D'ailleurs, l'efficacité de la cellule tandem  $Al_xGa_{1-x}As/CIGS$  a atteint 35% pour  $0,22 < x < 0,42$  ( $1,7 \text{ eV} < E_g < 1,94 \text{ eV}$ ) [54].

Paramètres	Expression en fonction de la fraction molaire x
Densité ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	$5,32 - 1,56x$
Mobilité d'électrons ( $\text{cm}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	$0 < x < 0,45 \quad 8 \cdot 10^3 - 2,2 \cdot 10^4 x + 10^4 x^2$ $0,45 < x < 1 \quad -255 + 1,16 \cdot 10^3 x - 720 x^2$
Mobilité des trous ( $\text{cm}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$ )	$370 - 970 x + 740 x^2$
Affinité électronique (eV)	$x < 0,45 \quad 4,07 - 1,1 x$ $x > 0,45 \quad 3,64 - 0,14 x$
Coefficient de diffusion des électrons ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$0 < x < 0,45 \quad 200 - 550x + 250x^2$ $0,45 < x < 1 \quad -6,4 + 29x - 18 x^2$
Coefficient de diffusion des trous ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )	$9,2 - 24x + 18,5x^2$
Vitesse thermique des électrons (m/s)	$0 < x < 0,45 \quad (4,4 - 2,1 x) \cdot 10^5$
Vitesse thermique des trous (m/s)	$(1,8 - 0,5x) \cdot 10^5$
Température de Debye ( $\text{K}^\circ$ )	$370 + 54x + 22x^2$
Densité effective d'états des électrons dans la BC, $N_c$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$x < 0,45 \quad 2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,063 + 0,083 x)^{3/2}$ $x > 0,45 \quad 2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,85 - 0,14 x)^{3/2}$
Densité effective d'états des trous dans la BV, $N_v$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$2,5 \cdot 10^{19} \cdot (0,51 + 0,25 x)^{3/2}$

**Tableau I.3** Paramètres de bases de l'alliage  $Al_xGa_{1-x}As$  en fonction de la fraction d'Al à 300 K [50].

Par ailleurs, la sensibilité spectrale absolue des photodétecteurs AlGaAs/GaAs, a été mesurée et ramenée à 0,112 A/W à une longueur d'onde maximale de 530-570 nm [53]. Enfin, d'autres investigations [16] montrent que la graduation du gap du système  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  produit un champ électrique intégré qui collecte efficacement les électrons photogénérés dans la couche tampon ( $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ) et permet une meilleure estimation des performances des photocathodes  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ .

## I.6 Structure des Bandes

La structure des bandes est la relation entre l'énergie de la particule et son vecteur d'onde,  $k$ , dans les directions de plus hautes symétries de la première zone de Brillouin. Elles se décomposent en bandes de valence, BV, et bandes de conduction, BC. La bande de valence est la plus basse, la bande de conduction est la plus haute et la bande interdite ou le gap. La structure des bandes d'énergie est très nécessaire pour l'étude des propriétés électroniques des semi-conducteurs. Bien que le gap soit la valeur d'énergie séparant le bas de la BC et le haut de la BV, il varie faiblement en fonction de la température. Aussi, les bandes d'énergie donnent les états d'énergie possibles pour les électrons en fonction de leur vecteur d'onde.

### I.6.1 Gap Direct et Gap Indirect

La notion de gap direct et indirect est liée à la représentation de la dispersion énergétique d'un semi-conducteur, autrement dit au diagramme  $E(k)$ . Lorsque le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent à valeur voisine du nombre d'ondes  $K$  (sur le diagramme  $E(K)$ ), le semi-conducteur est dit à gap direct. Inversement, lorsque le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction se situent à des valeurs distinctes du nombre d'ondes  $K$ , le semi-conducteur est dit à gap indirect comme illustré par la figure I.4. La transition électronique entre le haut de la bande de valence et le bas de la bande de conduction conserve le vecteur d'onde ( $\Delta k = 0$ ) pour un gap direct (figure I.4.B), et  $\Delta k \neq 0$  pour gap indirect (figure I.4.A).

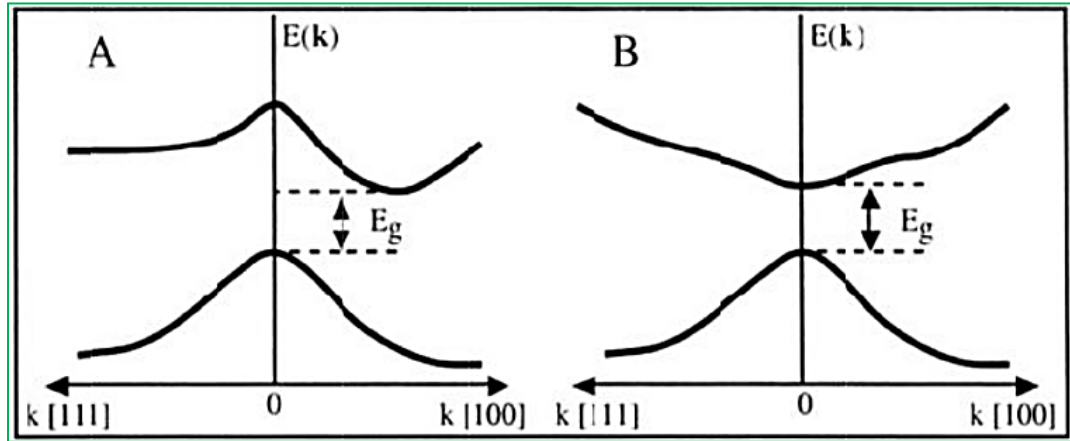


Figure I.4 Représentation du gap d'énergie: A) gap indirect et B) gap direct [30].

### I.6.2 Gap D'énergie de La Structure $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Il est bien connu que le GaAs est un semi-conducteur à gap direct de 1,42 eV à 300 K. Alors que l'AlAs est un semi-conducteur à gap indirect. Cependant, la bande interdite énergétique des alliages arséniure d'aluminium et de gallium,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , dépend de la fraction d'aluminium,  $x$ . En effet, la tendance générale permet d'écrire la bande interdite d'un alliage  $\text{AB}_x\text{C}_{1-x}$  en termes du gap de ses composés purs  $E_{AB}$  et  $E_{AC}$  par la formule semi-empirique:

$$E_g(x) = xE_{AB} + (1 - x)E_{AC} - x(1 - x) \quad (\text{I.4})$$

Sachant que pour :

- $x < 0,45$ , le gap est direct et la probabilité de transition radiative est élevée.
- $x > 0,45$ , le gap est indirect.

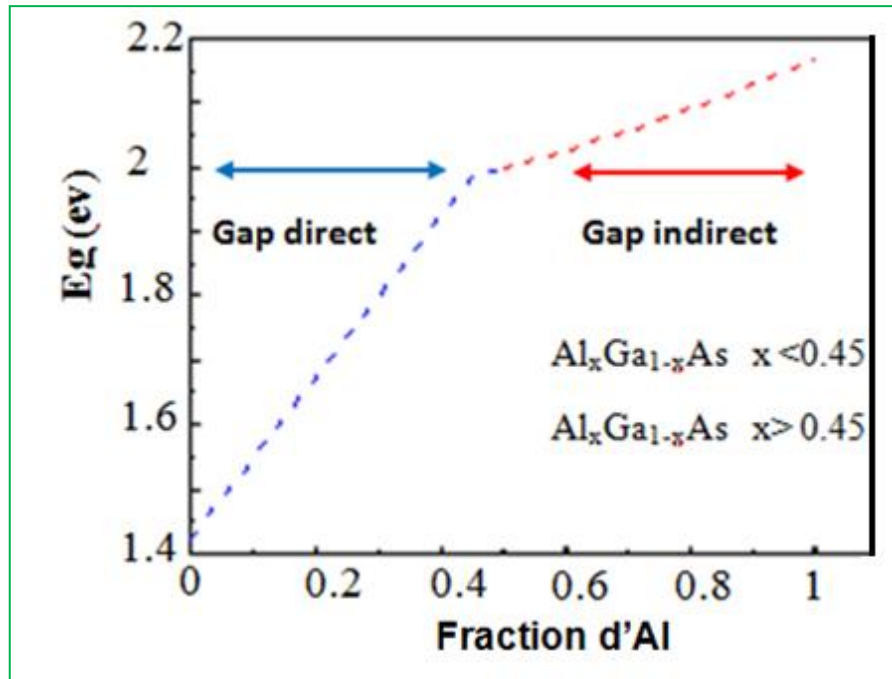
Dans le cas du composé  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , les équations descriptives des variations du gap en fonction de la fraction d'aluminium,  $x$ , sont disponibles dans [50]:

$$x < 0,45 \quad 1,424 + 1,247 x \quad (\text{eV}) \quad (\text{I.5})$$

$$x > 0,45 \quad 1,9 + 0,125x + 0,143 x^2 \quad (\text{eV}) \quad (\text{I.6})$$

À cet effet, il s'avère nécessaire de calculer le gap d'énergie  $E_g$  à 300 K, tout en variant la fraction molaire d'Al pour le ternaire  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  en utilisant les équations (I.5) et (I.6). La figure I.5 illustre la variation du gap en fonction de la fraction molaire,  $x$ . Il est clair la

concentration d'Al augmente la valeur de la bande interdite d'énergie. La valeur la plus basse de 1,42 eV correspond au GaAs et la plus grande de 2,16 eV est celle du AlAs. Ceci dénote que des matériaux avec des gaps différents peuvent être obtenus en modifiant la



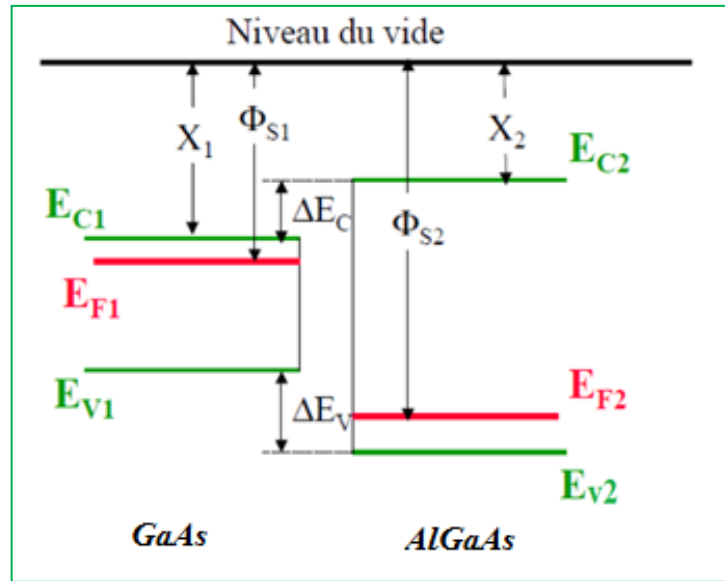
**Figure I.5** Gap d'énergie de l'alliage  $Al_xGa_{1-x}As$  en fonction de la fraction d'Al  $x$  à 300 K.

fraction d'Al. Par conséquent, des cellules solaires à l'arséniure de gallium peuvent absorber la lumière de différentes longueurs d'onde dans le spectre solaire en utilisant une structure multicouche, conduisant à une efficacité de conversion photoélectrique plus élevée [47].

### I.6.3 Discontinuités des Bande dans l'Hétérostructure $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$

#### a) L'hétérojonction $AlGaAs/GaAs$

Dans la nouvelle technologie, les hétérostructures III-V à base d'Aluminium sont particulièrement des plus attractives. La plus simple des hétérostructures est l'hétérojonction composée deux semi-conducteurs différents. Par exemple, l'hétérostructure  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ , est une jonction formée par la juxtaposition de deux matériaux de natures différentes [17]: (i) matériau de grand gap, l' $AlGaAs$  et (ii) matériau à petit gap, le  $GaAs$ , (figure I.6). En plus, les deux matériaux se différencient par leur gap,  $E_g$ , leur travail de sortie,  $\Phi$ , et leur affinité électronique  $\chi$ .



**Figure I.6** Diagramme de bandes d'énergie de deux matériaux de gap différents (AlGaAs et GaAs) [55].

Le système d'hétérostructure  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ , est potentiellement utile pour les applications de dispositifs digitaux à haute vitesse, microonde à haute fréquence et dispositifs électro-optiques. Il pourrait être avantageux pour les détecteurs, les filtres optiques, les dispositifs de commutation photonique et d'autres développement de nouveaux types de dispositifs optoelectroniques et photoniques [16, 56]. Une stratégie importante moderne pour augmenter encore l'efficacité des cellules solaires consiste à empiler des matériaux de cellules solaires avec différentes bandes interdites pour absorber différentes couleurs du spectre solaire [57]. Ainsi, ces deux semi-conducteurs formant le puits et la barrière sont pratiquement en accord de maille. Ceci permet d'avoir des hétéro-interfaces sans défaut, sans contrainte et de hautes qualités. En l'absence de tout contact les diagrammes énergétiques de l'hétérojonction  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  sont représentés dans la figure I.6, où :

- $E_{C1}$ : l'énergie de bande de conduction du matériau 1 (GaAs).
- $E_{C2}$ : l'énergie de bande de conduction du matériau 2 (AlGaAs).
- $E_{V1}$ : l'énergie de bande de valence du matériau 1.
- $E_{V2}$ : l'énergie de bande de valence du matériau 2.
- $E_{F1}$ : l'énergie de niveau de Fermi du matériau 1.
- $E_{F2}$ : l'énergie de niveau de Fermi du matériau 2.
- $\Delta E_C$ : différence d'énergie des bandes de conduction  $E_{C1}$  et  $E_{C2}$ .
- $\Delta E_V$ : différence d'énergie des bandes de valence  $E_{V1}$  et  $E_{V2}$ .



$\chi_1$ : affinité électronique du matériau 1.

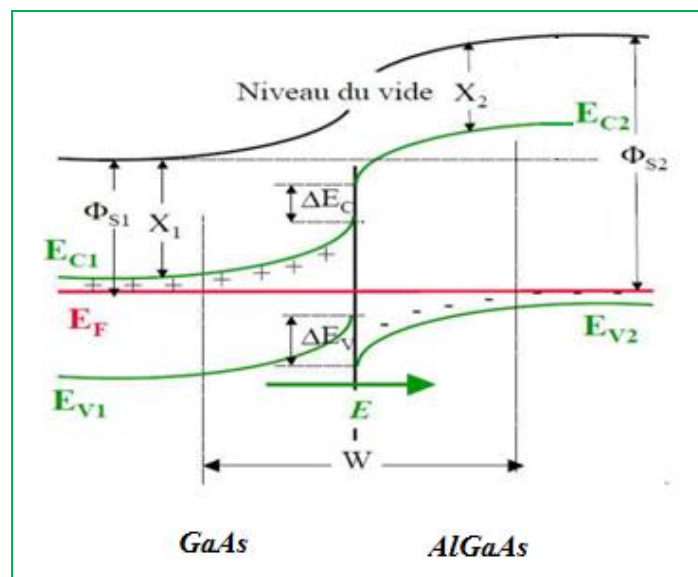
$\chi_2$ : affinité électronique du matériau 2.

$\Phi_1$ : travail de sortie du matériau 1.

$\Phi_2$ : travail de sortie du matériau 2.

**b) Discontinuités des Bandes**

D'après les règles «d'Anderson » [55], lorsque deux semiconducteurs sont mis en contact, ils échangent des électrons de manière à aligner leurs niveaux de Fermi. Cet échange se fait au voisinage de la jonction et fait apparaître, comme dans la jonction pn, une charge d'espace à laquelle est associée une barrière de potentielle (la tension de diffusion  $V_d$ ) qui arrête la diffusion des porteurs et définit l'état d'équilibre. Le diagramme des bandes pour les matériaux mis en contact est représenté par la figure I.7. On note une ligne horizontale qui marque le niveau de Fermi. Les zones de charges d'espaces se constituer par le dépeuplement ou l'accumulation de porteurs. Les bandes de conduction et de valence présentent une discontinuité à l'interface où se crée un puits de potentiel.



**Figure I.7** Diagramme des bandes d'énergie d'une hétérojonction à l'équilibre [55].

La discontinuité de la bande de valence est exprimé par l'équation suivante [50]:

$$0 < x < 1 \quad \Delta E_v = -0,46 x \quad (eV) \quad (I.7)$$

Alors que la discontinuité de la bande de conduction est donnée par :

$$\Delta E_c = \Delta E_g(x) - \Delta E_v \quad (\text{I.8})$$

Ainsi à 300 K, on a:

$$\text{Pour } x < 0,41 \quad \Delta E_c(\text{eV}) = 1,25x - 0,46x = 0,79x \quad (\text{I.9})$$

$$\text{Pour } x > 0,41 \quad \Delta E_c(\text{eV}) = 0,475 - 0,335x + 0,143x^2 \quad (\text{I.10})$$

Les différents paramètres relatifs au GaAs sont obtenus en donnant à  $x$  la valeur zéro dans les équations précédentes.

## I.7 Applications

En électronique rapide et en optoélectronique, les composés semi-conducteurs III-V sont préférables que d'autres matériaux surtout avec l'évolution technologique actuelle. Dans ce qui suit, nous citons brièvement quelques dispositifs à base des semi-conducteurs GaAs, AlAs, et l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , telle que : la diode, cellule solaire, réseaux nano fils, capteur, photodétecteurs et les transistors.

### I.7.1 Diodes

La distribution des électrons à travers la diode varie en fonction de la gradation d'Al et Ga dans le système GaAs/AlGaAs. L'impact de la gradation de l'interface GaAs/AlGaAs sur la dynamique des porteurs dans une diode à barrière de puits de potentiel, PWB, montrer l'existence des variations dans le comportement des diodes des trois hétérostructures, à savoir GaAs/ $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ , GaAs/ $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$  et GaAs/ $\text{Al}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$  avec des décalages de bande correspondants de 0,10, 0,25 et 0,30 eV, respectivement, est comparé en termes de vitesse moyenne des électrons, d'énergie moyenne des électrons et de densité de charge le long des régions intrinsèques et dans le puits de potentiel. Des différences significatives existent dans le comportement des trois hétérojonctions car cela a un impact sur le coefficient de courbure et le facteur d'idéalité de la diode. Le facteur d'idéalité et le coefficient de courbure reflètent tous deux l'amplitude du décalage de bande des hétérojonctions (interface). Cela montre un effet significatif sur les performances de la diode. Noter que les diodes avec un décalage de bande plus petit (dans ce cas GaAs/ $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ ) conviennent lorsque la vitesse et l'application haute fréquence sont de la plus haute importance car elles ont une barrière de potentiel plus petite et s'allument donc rapidement par rapport aux diodes avec une bande plus large [58].

Étant donné que le system GaAs/AlGaAs est un matériau composé clé pour la photonique, car ils fournissent une émission et une absorption optiques dans une large gamme de longueurs d'onde, le développement de dispositifs à partir de ces matériaux avec une grande efficacité d'extraction et une taille ultra petite pour des applications d'économie d'énergie est hautement souhaitable pour les applications à haute luminosité dans les longueurs d'onde du rouge profond et du proche infrarouge [59]. On citera quelque type des diodes à base d'AlGaAs, et GaAs :

#### **a) Diode laser**

Le LASER, (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), est un procédé d'amplification de la lumière par émission stimulée de photons. La lumière produite est monochromatique, directionnelle, cohérente et de haute intensité. Les premières diodes laser étaient réalisées à base d'homojonction GaAs en 1962 sans confinement latéral. Elles sont utilisées en régime pulsé à cause des fortes densités de courant d'injection qu'elles nécessitaient pour leur fonctionnement. Les diodes laser actuelles sont à hétérojonctions et à base d'alliages ternaires. Ainsi en variant la fraction  $x$  d'aluminium, dans le mélange  $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ , une jonction pn au GaAlAs peut émettre de 750 nm à 900 nm et couvrir entièrement la gamme de la première fenêtre optique.  $\lambda = 850$  nm pour l' $\text{Ga}_{0.9}\text{Al}_{0.1}\text{As}$  [60].

#### **b) Diodes électroluminescentes LED**

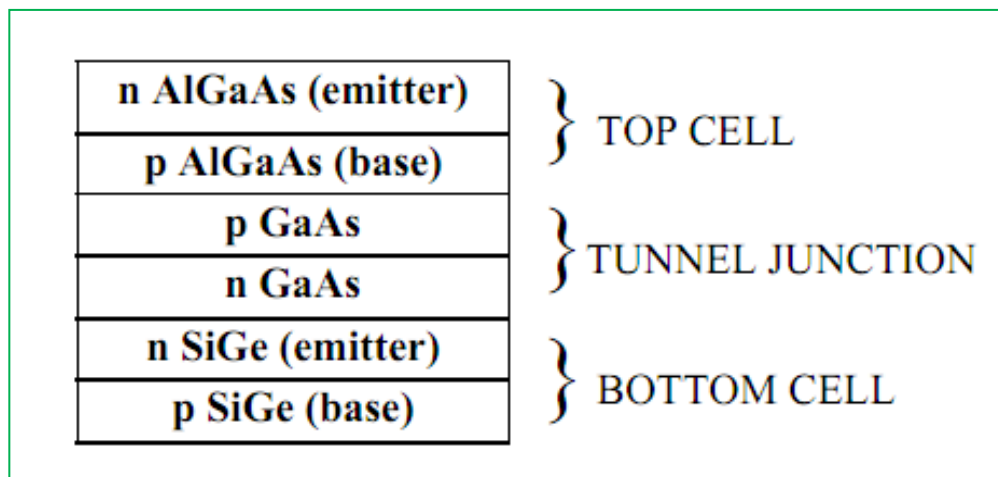
L'investigation photovoltaïque sur plus de 20 types de diodes électroluminescentes, LED: (*Light emitting diode*), à base de structure AlGaAs, fonctionnant dans la gamme de longueurs d'onde de 830 à 970 nm ont été étudiées. Il ressort que les structures semi-conductrices  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  utilisées dans ces dispositifs peuvent également être utilisées pour la fabrication de convertisseurs photovoltaïques de rayonnement monochromatique avec un rendement assez élevé [61].

Notamment, la réduction des dispositifs actifs à l'échelle nanophotoniques, à savoir les nano-lasers et les nano-diodes électroluminescentes (nano-LED), à des tailles sub-micrométriques profondes (sous- $\mu\text{m}$ ), est essentielle pour obtenir des ultra-petits ( $<1 \mu\text{m}^2$ ), une faible consommation d'énergie ( $<10$  fJ/bit) et sources de lumière efficaces ( $>10$  %), sont nécessaires pour les circuits intégrés photoniques compacts, PIC, pour les communications optiques [62]. A cet effet, les matériaux semi-conducteurs composés III-V sont très souhaitable comme milieu actif. Ces matériaux à indice de réfraction élevé, disposés dans des structures de longueur d'onde inférieure, ont récemment

montré qu'ils fournissaient des moyens efficaces de manipuler la lumière à l'échelle nanométrique grâce aux interférences de mode et à l'amélioration des champs électriques et magnétiques, ce qui permet de nouveaux lasers [63] et dispositifs de détection [59, 64].

### I.7.2 Cellule Solaire

L'un des principaux avantages du GaAs pour les applications photovoltaïque, PV [47, 57] est qu'il offre une large gamme d'options de conception potentielles. Les cellules à base de GaAs peuvent avoir plusieurs couches avec une composition légèrement différente qui permettent un contrôle plus précis de la génération et de la collecte d'électrons et de trous que les cellules au silicium, qui sont limitées aux changements du niveau de dopage pour obtenir les mêmes résultats. Ce degré de contrôle plus élevé permet d'atteindre des rendements plus proches de la limite théorique. La figure I.8 illustre un modèle simple de cellules solaires en cascade: une jonction tunnel (GaAs) est prise entre la cellule supérieure (AlGaAs) et la cellule inférieure (SiGe) [65]. Notamment, les cellules multi-jonctions sont composées de différents matériaux déposés en couches minces, leur utilisation permet d'optimiser le spectre solaire. Ainsi chaque jonction travaille avec son efficacité optimale.



**Figure I.8** Cellule solaire tandem de structure AlGaAs/SiGe [65].

D'autre part, l'efficacité de la conversion de cette cellule s'est avérée augmenter de manière significative avec la concentration de dopage dans la plage de  $10^{15}$  à  $10^{17}$   $\text{cm}^{-3}$  de 19,52 % à 31,19 %. Ces résultats sont très prometteurs pour de futures applications potentielles dans la technologie des cellules solaires multijonctions et haute performance AlGaAs/SiGe.

### I.7.3 Réseaux Nano Fils $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Différentes valeurs de la fraction d'Al et distributions d'épaisseur de sous-couche sont considérées dans les performances d'absorption de la lumière par des nano fils  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  [66]. La conception de la structure optique  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  avec une plage de composition variable de 0 à 0,4 montrent une meilleure capacité d'absorption optique par rapport aux autres configurations. Par ailleurs, pour les nanofils  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  dont la fraction d'Al varie de 0 à 0,4 et de 0 à 0,8, l'absorbance de la structure avec une épaisseur de sous-couche croissante est supérieure à celle des structures à épaisseur uniforme. Cependant, la structure avec une épaisseur décroissante possède la plus mauvaise performance. Pour les réseaux nanofils en  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , l'absorption optique maximale peut être obtenue lorsque l'angle de la lumière incidente est de  $60^\circ$ . Cette conception fournir une référence pour sélectionner ces paramètres pour l'optimisation des applications de cellules solaires.

### I.7.4 Capteur De Résonance Plasmonique

La figure I.9 représente la structure schématique d'un capteur à résonance plasmonique de surface (Résonance des plasmons de surface), SPR, à base d'arséniure de

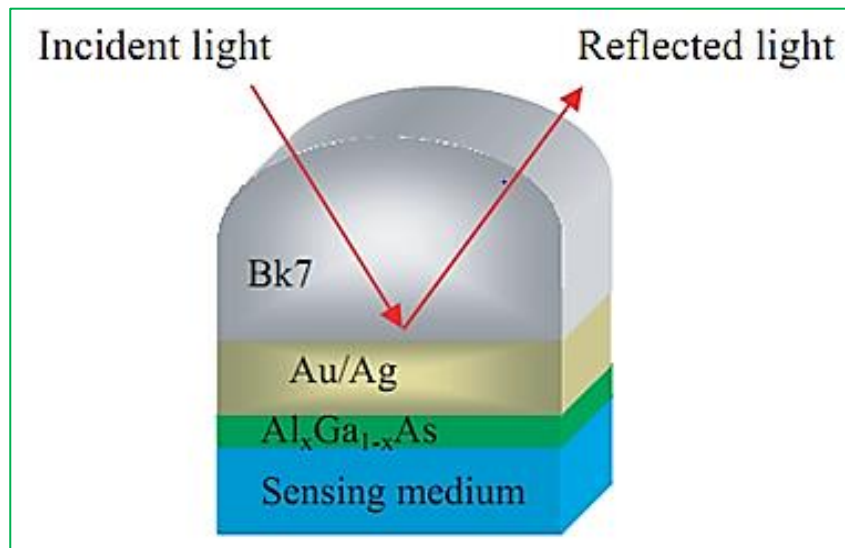


Figure I.9 Schéma de capteur à résonance plasmonique de surface [52].

gallium et d'aluminium  $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  avec des couches d'or, Au, et d'argent, Ag, à une Longueur d'onde de 633 nm [52]. Il a été montré que lorsque l'épaisseur d' $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  augmente, la sensibilité de l'arséniure d'aluminium et de gallium, avec une couche de métal spécifique Au ou Ag, augmente. Les sensibilités des capteurs à base d' $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  sont respectivement de 80,55 % (film Au) et 34,74 % (film Ag) plus élevées que les capteurs conventionnels Au et Ag. De plus, ce capteur SPR présente les avantages d'une sensibilité angulaire élevée, des largeurs de résonance étroites et d'une réflectance minimale faible, ce qui en fait un bien meilleur choix pour la biodétection.

### I.7.5 Photodétecteurs

L'hétérostructure  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$  est très utile dans les biocapteurs photoniques et les scintillateurs à luminescence. Particulièrement, dans un photodétecteur basé sur le système  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$ , le pic d'absorption se rencontre à la longueur d'onde photonique  $\sim 0,76 \mu\text{m}$ . tant que le choix de la fraction d'Al est de 0,2 pour l'AlGaAs est pour former l'hétérostructure à puits multi-quantiques, MQW, qui pourrait fonctionner comme un photodétecteur. Pour d'autres fractions d'Al, la structure AlGaAs/GaAs fonctionne comme hétérostructure photoémettrice et présente un bon gain optique [19, 53].

### I.7.6 Les Transistors

#### *a) Transistor bipolaire à hétérojonction*

Le transistor bipolaire à hétérojonction, HBT, présente de multiples avantages : gain en courant stable, fréquence de coupure élevée, gain en puissance élevé, vitesse de commutation élevée. De plus, les transistors HBT présentent l'avantage supplémentaire d'améliorer les performances et de fonctionner dans des conditions de très basse température. La figure I.10 présente la structure d'un transistor bipolaire à hétérojonction. Ce transistor est destiné aux applications hautes fréquences.

Les communications modernes nécessitent une linéarité élevée pour les amplificateurs de puissance. Il a été prouvé que les amplificateurs à base de transistors bipolaires à hétérojonction HBT GaAs ont un rendement élevé, une bonne linéarité, une solidité et un faible coût. De plus, les HBT GaAs sont largement utilisés pour les

applications sans fil car ils offrent d'excellentes caractéristiques telles qu'une densité de puissance élevée et un rendement élevé [67].

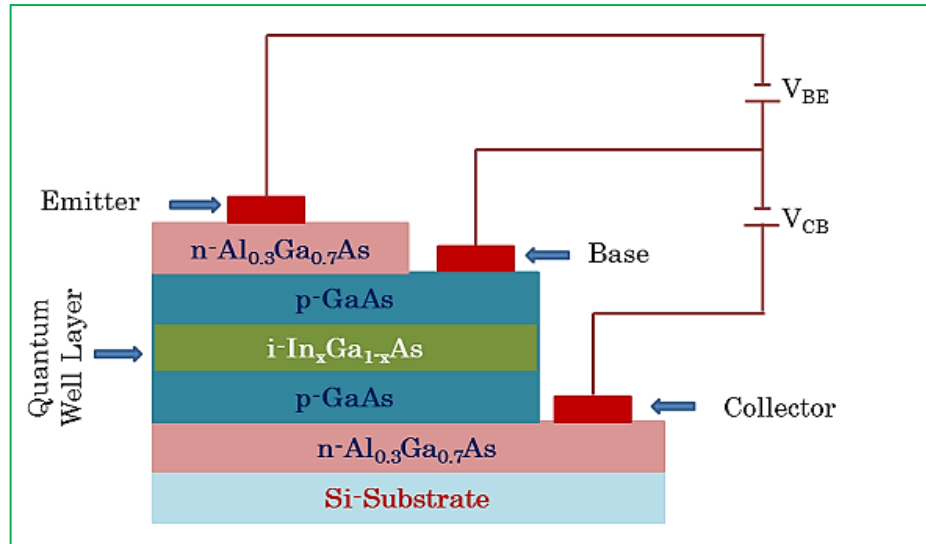


Figure I.10. Structure HEBT à puits quantique [51].

Aussi, l'AlGaAs possède des caractéristiques électrochimiques proches de celles du semi-conducteur composite GaAs. Les constantes de réseau des matériaux sont proches, permettant la production de jonction métallurgique de haute qualité [68]. Ces dernières années, le HBT occupe la première place sur le marché des hautes fréquences, comme la communication par satellite, la communication par téléphone mobile et d'autres applications sans fil [69].

### ***b) Transistors à haute mobilité électronique HEMT***

Le HEMT constitue une évolution majeure du MESFET, (*Metal Semiconductor Field Effect Transistor*). Il a rapidement démontré des performances supérieures au MESFET, classique et s'est imposé dans la conception de circuits intégrés analogiques. Il fournit de plus des opérations à faible niveau de bruit dans des applications d'amplification petit signal. Les performances du HEMT sont principalement dues à la technique de modulation de dopage. Les électrons sont physiquement séparés de leurs ions donneurs et injectés dans le canal, formant ainsi un gaz bidimensionnel d'électrons dans un matériau dépourvu d'impuretés.

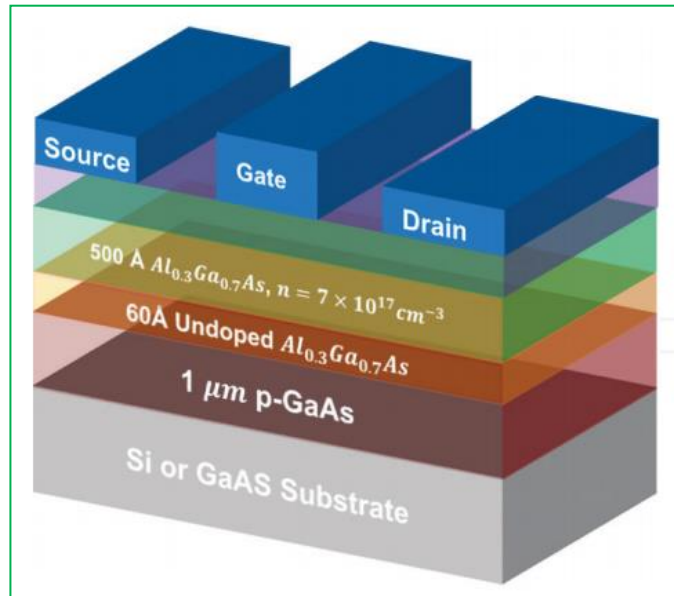


Figure I.11 Structure de HEMT à base de GaAs [70].

## I.8 Conclusions

Dans ce chapitre, des notions générales ont été présentées, et qui englobent les propriétés physiques, structurales, et énergétiques des matériaux l'arsenic de gallium (GaAs), et l'arsenic d'aluminium (AlAs), et leur alliage ternaire aluminium de l'arsenic de gallium ( $Al_xGa_{1-x}As$ ), qui les rendent de bons candidats pour les applications modernes en électronique et optoélectronique. Ainsi, nous avons présenté les effets de la fraction d'aluminium sur divers paramètres de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ . À la fin, nous avons cité quelques dispositifs à base des semi-conducteurs GaAs, AlAs, et l' $Al_xGa_{1-x}As$ , telle que : la diode, cellule solaire, réseaux nano fils, capteur, photodétecteurs et les transistors.



***CHAPITRE II***  
***PROPRIÉTÉS ÉLASTIQUES DES***  
***MATÉRIAUX GaAs, AlAs ET LEURS***  
***ALLIAGES TERNAIRES  $Al_xGa_{1-x}As$***

---

## II.1 Introduction

Les semi-conducteurs composés sont de plus en plus requis pour une large gamme de dispositifs électroniques et optoélectroniques. Cependant, l'intégration de deux ou plusieurs matériaux semi-conducteurs composés dans des hétérostructures sans une certaine perte de qualité cristalline est généralement difficile à réaliser. Les contraintes dues à la non-concordance du réseau avec le substrat, ainsi que les différences de coefficients de dilatation thermique, entraîneront plus que probablement des défauts structurels qui pourraient éventuellement dégrader le comportement du dispositif [1]. Particulièrement, les défauts structurels sont très courants dans les semi-conducteurs III-V. Également, il a été constaté que la forte densité de défauts structuraux affecte leurs propriétés optoélectroniques [2-3]. Dans d'autres applications, les défauts affectent aussi les performances des capteurs photoactifs [4], l'efficacité des catalyseurs à base d'oxyde [5], ainsi que l'efficacité des dispositifs de conversion de la lumière solaire en énergie électrique [6]. Par conséquent, la surveillance et l'identification de ces défauts sont d'une importance cruciale pour une fabrication conforme de dispositifs. Notamment, une meilleure connaissance des différentes propriétés des matériaux et une meilleure compréhension des mécanismes de formation des défauts sont essentielles pour les tâches critiques d'optimisation des conditions de croissance et d'obtention de matériaux composés de la plus haute qualité possible.

Parmi les techniques principales de contrôle ou de test de qualité des matériaux, on cite la micro-caractérisation non destructive, CND. Il est bien de savoir qu'un mémorandum technique de la *National Aeronautics and Space Administration*, NASA, a préconisé la nécessité des techniques de test non destructif, NDT, ou l'évaluation non destructive, NDE, et fourni les principales lacunes et recommandations pour appliquer avec succès les NDT /NDE aux pièces et artefacts [7]. Notons que les défis de l'évaluation non destructive sont transversaux et couvrent les disciplines de matériaux de la fabrication à la modélisation en passant par l'assurance de qualité, tests, etc.

Notamment, la micro-caractérisation non destructive des propriétés élastiques est non seulement cruciale mais aussi nécessaire à la quantification des variations des paramètres élastiques. Par ailleurs, toute utilisation spécifique d'un matériau dans l'industrie technologique nécessite une information sur ses caractéristiques mécaniques [8]. Particulièrement, le CND est un élément essentiel dans les stratégies de maintenance et de contrôle des structures, composants critiques et installations industrielles. Le CND ne se

limite pas seulement aux contrôles lors de la fabrication. Par exemple, les principes des techniques CND sont utilisés dans les diagnostics médicaux, particulièrement pour la détection de tumeurs, fractures, etc. [9].

En effet, l'importance de ces contrôles est considérable puisque qu'ils permettent de garantir un haut niveau de qualité et de sécurité du matériel [10]. Sa mise en œuvre consiste à réaliser des contrôles souvent périodiques qui visent à obtenir des informations sur le comportement du composant ou de sa structure sans altérer son utilisation ultérieure. A cet effet, la connaissance des propriétés élastiques est donc bien adaptée pour décrire la structure des matériaux en fonction de leur composition [8].

La microscopie acoustique est une méthode de contrôle non destructif qui utilise les ultrasons, dans une gamme de fréquence allant du Méga Hertz au Giga Hertz, permettant d'extraire les propriétés mécaniques des matériaux. Elle s'est développée comme une technique de micro caractérisation non destructive des propriétés élastiques des matériaux [11]. Cette méthode, utilisant les ondes ultrasonores pour une caractérisation qualitative (imagerie) et quantitative (microanalyse), est basée sur la propagation des ondes élastiques dans la matière. Ces ondes se propagent selon différents modes dont nous citons: (i) ondes longitudinales définies par un mouvement des particules parallèle à la direction de propagation de l'onde et (ii) ondes transversales dont le mouvement des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde [12-13]. La description de ces ondes ultrasonores fait intervenir les paramètres fondamentaux de la matière: vitesse, fréquence, vecteur d'onde, élasticité, viscosité, structure (couche mince, matériau massif, etc) [10, 14].

Quant aux propriétés élastiques sont liées à divers phénomènes fondamentaux de l'état solide tels que l'équation d'état, le potentiel interatomique et les spectres de phonons. De même, ces propriétés sont également liées thermodynamiquement à la chaleur spécifique, à la température de Debye, à la dilatation thermique, au point de fusion, etc. [15-16]. En effet, nous nous sommes intéressés aux propriétés élastiques des matériaux semi-conducteurs III-V: GaAs, AlAs, et le ternaire  $Al_xGa_{1-x}As$ , par une simulation théorique effectuée dans le cas d'un microscope acoustique à balayage, SAM, fonctionnant en mode de réflexion.

## II.2 Élasticité des Matériaux

La théorie de l'élasticité traite la capacité d'un matériau à revenir à sa forme initiale après la suppression de la contrainte appliquée. En effet, lorsqu'on exerce une contrainte sur un cristal, celui-ci se déforme modifiant ainsi les paramètres qui le décrivent : ce sont les déformations homogènes du cristal. Dans la région proche de l'équilibre des atomes, le développement quadratique de l'énergie du solide permet d'exprimer une relation linéaire entre la contrainte et la déformation: il s'agit de la loi de « Hooke » (II.1) :

$$\sigma_{ij} = C_{ij} \cdot \varepsilon_{ij} \quad (\text{II.1})$$

où  $C_{ij}$  est le tenseur des constantes élastiques,  $\varepsilon_{ij}$  est le tenseur des déformations et  $\sigma_{ij}$  est le tenseur des contraintes. En science des matériaux, les constantes élastiques,  $C_{ij}$ , contiennent des informations importantes qui permettent de définir la stabilité mécanique du solide face aux déformations en déterminant leur réponse aux forces appliquées. Notamment, une structure cristalline donnée ne peut être dans une phase stable ou métastable que si ses constantes élastiques obéissent à la condition de stabilité élastique qui stipule que,  $C_{11} - C_{12}$  et  $C_{44}$  soient positifs [15-17].

### II.2.1 Paramètres Élastiques

Le module d'élasticité est une grandeur intrinsèque du matériau, il exprime l'aptitude du matériau à se déformer élastiquement sous l'effet d'une contrainte. Notons que, l'allongement devrait être plus grand lorsque le module est faible [18].

#### a) Constantes élastiques

La connaissance des constantes élastiques, qui sont liées aux propriétés mécaniques d'un solide: déformation interne, déformation sous charge, contrainte thermo élastique, vitesses du son et ténacité à la rupture, est essentielle pour de nombreuses applications essentielles. Aussi, leur détermination est très importante pour comprendre et donner des informations sur la stabilité des matériaux étudiés. Les composés GaAs, AlAs et leurs alliages ternaires  $Al_xGa_{1-x}As$ , considérés dans cette étude, possèdent une symétrie cubique. De ce fait, uniquement trois constantes élastiques sont indépendantes :  $C_{11}$ ,  $C_{12}$  et  $C_{44}$ . Le tableau (II.1) regroupe les constantes élastiques des composés étudiés dans le présent travail, déterminé par le modèle d'interpolation.

Constantes élastiques ( $10^{11}$ dyn/cm <sup>2</sup> )	GaAs	AlAs	$Al_xGa_{1-x}As$
$C_{11}$	11,88	12,02	$C_{11} = (11,88 + 0,14 x)$
$C_{12}$	5,38	5,70	$C_{12} = (5,38 + 0,32 x)$
$C_{44}$	5,94	5,89	$C_{44} = (5,94 - 0,05 x)$

**Tableau II.1** Constantes élastiques des matériaux GaAs, AlAs et  $Al_xGa_{1-x}As$  à 300 k [19].

### b) Modules élastiques

Les modules élastiques sont définis comme le rapport du changement de la pression et du changement fractionnel des dimensions. Généralement, pour un matériau isotrope, il existe quatre modules indépendants : module de Young, E, module de cisaillement, G, coefficient de Poisson,  $\sigma$ , et le module de compressibilité, B. Ces quatre modules élastiques permettent de donner les résultats d'élasticité d'un matériau [16]. Notons que, dans le cas d'une symétrie cubique, ces modules sont étroitement liés aux constantes élastiques par les relations suivantes :

$$E = \frac{C_{44}(3C_{11}-4C_{44})}{C_{11}-C_{44}} \quad (II.2)$$

$$G = C_{44} \quad (II.3)$$

$$\sigma = \frac{C_{11}-2C_{44}}{2(C_{11}-C_{44})} \quad (II.4)$$

Ainsi que, le module de compressibilité (masse), B, de ce système peut être exprimé comme une combinaison linéaire de  $C_{11}$  et  $C_{12}$ .

$$B = \frac{C_{11}+2C_{12}}{3} \quad (II.5)$$

De plus, la micro caractérisation acoustique est une méthode dynamique non destructive qui permet de déterminer ces modules. Elle consiste à soumettre des échantillons à des vibrations longitudinales et transversales se propageant respectivement par des vitesses  $V_L$  et  $V_T$ . A partir de ces dernières vitesses  $V_L$ , et  $V_T$  on peut facilement déterminer les modules élastiques d'un matériau choisi selon les relations suivantes :

$$E = \rho V_L^2 \quad (II.6)$$

$$G = \rho V_T^2 \quad (II.7)$$

$$\sigma = \frac{(v_L^2 - 2 v_T^2)}{(v_L^2 - v_T^2)} \quad (\text{II.8})$$

$$B = \frac{\rho(v_L^2 - 4 v_T^2)}{3} \quad (\text{II.9})$$

## II.2.2 Expressions des Modules Élastiques du Composé $Al_xGa_{1-x}As$

Pour un composé ternaire dont les modules sont fortement liés à la fraction molaire,  $x$ , il serait intéressant d'exprimer les modules élastiques en fonction de  $x$ . Ainsi, pour l'alliage  $Al_xGa_{1-x}As$ , les relations descriptives des variations des modules élastiques en fonction de la fraction d'Al sont les suivantes :

### (i) Module d'Young :

Dans les cristaux cubiques, Zinc-Blende, le module d'Young n'est pas isotrope. La variation dépend de la direction des axes cristallins. Pour la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ , dans la direction  $[100]$ , le module d'Young est donné par :

$$E(\text{dyn/cm}^2) = (8,53 - 0,18 x) \cdot 10^{11} \quad (\text{II.10})$$

### (ii) Module de Cisaillement :

Pour la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ ,  $G$  s'exprime en fonction de la fraction d'Al par:

$$G(\text{dyn/cm}^2) = (3,25 - 0,09 x) \cdot 10^{11} \quad (\text{II.11})$$

### (iii) Coefficient de Poisson:

C'est une grandeur adimensionnelle qui permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué. Dans le cas de l' $Al_xGa_{1-x}As$ , il s'écrit :

$$\sigma = (0,31 + 0,1 x) \quad (\text{II.12})$$

### (iv) Module de Compressibilité :

Il s'exprime en fonction de la fraction d'Al par:

$$B(\text{dyn/cm}^2) = (7,55 - 0,26 x) \cdot 10^{11} \quad (\text{II.13})$$

Notons qu'en général, les modules s'expriment en GPa.

## II.3 Théorie de Base et Formulation

### II.3.1 Coefficient de Réflexion

Le coefficient de réflexion,  $R(\theta)$ , fournit des informations précieuses sur la propagation des ondes dans un matériau [20]. C'est une fonction complexe qui admet un module,  $|R|$ , et une phase,  $\varphi$ . Ce coefficient dépend des conditions aux limites à l'interface couplant/solide: impédance acoustique,  $Z$ , densité,  $\rho$ , angle d'incidence,  $\theta$ , des différents modes de propagation [21]. Dans la représentation de  $R(\theta)$ , on devrait repérer tous les angles critiques auxquels chaque mode subit une réflexion totale. La fonction  $R(\theta)$ , pour les ondes acoustiques peut être calculée en résolvant l'équation acoustique de Fresnel [22-25], pour une interface liquide/solide, ce coefficient est donné par la relation suivante:

$$R(\theta) = \frac{(Z_{sol} - Z_{liq})}{(Z_{sol} + Z_{liq})} \quad (II.14)$$

Où  $Z_{sol}$  et  $Z_{liq}$  sont les impédances acoustiques des solide et liquide respectivement, elles sont exprimées comme suit :

$$Z_{sol} = \frac{\rho_{sol}V_L}{(\cos \theta_L \cos^2 2\theta_L)} + \frac{\rho_{sol}V_T}{\cos \theta_T \sin^2 2\theta_T} \quad (II.15)$$

$$Z_{liq} = \frac{\rho_{liq}V_{liq}}{\cos \theta} \quad (II.16)$$

Où  $\theta_L$ ,  $\theta_T$ , correspondent aux angles de réflexion totale des modes longitudinaux et transversaux respectivement,  $V_L$  et  $V_T$  sont respectivement les vitesses longitudinales et transversales:  $\rho_{sol}$ ,  $\rho_{liq}$ ,  $V_{liq}$  sont respectivement la densité du solide, du liquide de couplage et la vitesse de propagation des ondes dans le liquide.

### II.3.2 Signature Acoustique

La signature acoustique d'un matériau, également connue sous le nom de  $V(z)$ , représente la réponse de sortie,  $V$ , en fonction de la distance de défocalisation,  $z$ , lorsque l'échantillon est déplacé verticalement vers la lentille acoustique. Généralement,  $V(z)$  est maximal à la focale ( $z = 0 \mu m$ ) et varie au fur et à mesure que l'échantillon s'approche de la lentille ( $z \neq 0 \mu m$ ). Par conséquent, la réponse  $V(z)$  est la méthode la plus importante pour déterminer avec précision les vitesses de surface des matériaux. De telle signature peut être déterminée soit expérimentalement via des techniques de microscopie acoustique

à balayage, SAM, soit théoriquement à partir du modèle de spectre angulaire en utilisant la formule de « Sheppard et Wilson » [25] :

$$V(z) = \int P^2(\theta)R(\theta)\exp^{2jkz\cos\theta} \sin \theta \cos \theta d\theta \quad (\text{II.17})$$

Où  $\theta$  est l'angle entre un vecteur d'onde ( $k$ ) et l'axe de la lentille ( $z$ ),  $P^2(\theta)$  est la fonction pupille de la lentille,  $j = \sqrt{-1}$ , et  $R(\theta)$  est le coefficient de réflexion. Généralement, la réponse  $V(z)$  est un signal périodique de période spatiale  $\Delta z$ .

## II.4 Méthodologie

### II.4.1 Procédure

Les simulations théoriques ont été menées dans le cas de la microscopie acoustique à balayage (*Scanning Acoustic Microscopy, SAM*), en mode de réflexion qui se présente comme non seulement un complément aux autres technique de contrôle mais aussi un moyen essentiel dans la micro-caractérisation non destructive [26]. Le principe de fonctionnement de cette dernière est basé sur l'émission des ondes ultrasonores par un générateur et la réception de ces mêmes ondes réfléchies, en balayant l'échantillon considéré. En effet, cette méthode utilisant les ondes ultrasonores (longitudinal,  $V_L$ , transversal,  $V_T$ , et de Rayleigh,  $V_R$ ), peut être utilisée en imagerie (micro-caractérisation qualitative) et en microanalyse (micro-caractérisation quantitative).

Ainsi, la détermination d'une vitesse de propagation d'une se propageant dans un matériau consiste à suivre une simulation théorique permettant de faire pour chaque concentration d'Al les étapes suivantes :

- Calculer le coefficient de réflexion.
- Calculer les signatures  $V(z)$  de l'ensemble du système spécimen-lentille à partir du modèle de spectre angulaire.
- Dédire la vitesse du mode correspondant via l'analyse par Transformée de Fourier Rapide, FFT.

Par ailleurs, la procédure nécessite de connaître les valeurs des vitesses longitudinales et transversales, ainsi que les densités respectives du GaAs, AlAs, et du composé  $Al_xGa_{1-x}As$ . Ainsi, nous utilisons les relations suivantes données pour une structure cubique Zinc-Blende [19]:



$$\rho(kg/m^3) = 5320 - 1560 x \quad (II.18)$$

$$V_L(m/s) = 5400 + 790 x + 260 x^2 \quad (II.19)$$

$$V_T(m/s) = 2790 + 380 x + 120 x^2 \quad (II.20)$$

Notons que :

- pour  $x=0$  : les vitesses ultrasonores  $V_L$  et  $V_T$  et la densité sont à de celle du GaAs,
- pour  $x=1$  les paramètres sont ceux du AlAs.

Enfin, l'évaluation du coefficient de réflexion, de la signature acoustique ainsi que son traitement par FFT est régit par un programme de simulation développé depuis les années 90 dans notre Laboratoire.

## II.4.2 Détermination des Vitesses

La signature acoustique  $V(z)$  est le résultat d'interférence de différents modes de propagations dont le plus important est celui de Rayleigh se propageant avec une vitesse  $V_R$ , qui dépend de la capacité du milieu à supporter les contraintes longitudinales et transversales. Par ailleurs, l'onde de Rayleigh a reçu un intérêt considérable grâce à son utilité pour la détection des défauts de surface lors du test ultrasonore non destructif des matériaux [27-29].

Par ailleurs, une courbe  $V(z)$  calculée ou mesurée représente la signature de l'ensemble du système "échantillon-lentille". Pour déterminer la réponse de l'échantillon, il est nécessaire de soustraire la réponse de lentille,  $V_{lens}(z)$  :  $V_{sample} = V(z) - V_{lens}(z)$ .

Par conséquent, le traitement d'analyse spectrale par transformée de Fourier rapide, FFT, sera appliqué uniquement à la réponse réelle de l'échantillon,  $V_{sample}$ . Notons que les spectres FFT obtenus peuvent être constitués d'un seul ou de plusieurs pics. Cependant, dans des conditions normales de fonctionnement d'un SAM, le pic le plus important représente celui de Rayleigh. Par conséquent, à partir de la raie principale, qui correspond à une période spatial caractéristique,  $\Delta z$ , la vitesse du mode considéré,  $V_C$ , peut être déduite à partir de l'équation suivante [30]:

$$V_C = \frac{V_{Liq}}{[1 - (\frac{V_{Liq}}{2f \Delta z})^2]^{1/2}} \quad (II.21)$$

Où,  $f$ , est la fréquence de fonctionnement et l'indice,  $c$ , représente le mode considéré : Rayleigh, R, ou longitudinal, L, ou transversal, T( $C = R, L$  ou  $T$ ). Aussi, la vitesse de

Rayleigh qui est une grandeur intrinsèque d'un matériau peut être calculée par la relation approximative de « Victorov » [31]:

$$V_R = V_T \frac{0.718 - \left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2}{0.75 - \left(\frac{V_T}{V_L}\right)^2} \quad (\text{II.22})$$

### II.4.3 Conditions de Simulation

Les simulations théoriques ont été réalisées dans le cas d'un SAM, opérant en mode de réflexion dans les conditions de fonctionnement normales suivantes:

- Une fréquence de travail de 140 MHz
- L'eau comme liquide de couplage avec ( $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$  et  $V_L = 1500 \text{ m/s}$ ).
- Un demi-angle d'ouverture de  $50^\circ$ .

Il convient de noter que dans ces conditions, l'onde de Rayleigh est la plus dominante. Remarquons qu'une telle onde est d'une grande importance non seulement dans la détection de défauts de surface et dans les tests non destructifs de matériaux mais également dans les dispositifs à ondes acoustiques de surface.

## II.5 Propriétés Élastiques du GaAs

### II.5.1 Coefficient de Réflexion

Nous représentons dans la figure II.1 la courbe obtenue du coefficient de réflexion,  $R(\theta)$ , en fonction de l'angle d'incidence,  $\theta_i$ , pour le GaAs. Le coefficient de réflexion étant une fonction à valeurs complexes, nous calculons séparément son amplitude (module)  $|R(\theta)|$  et sa phase pour la structure: eau/GaAs.

Les résultats obtenus pour l'amplitude sont illustrés sur la figure II.1.a. On remarque clairement que lorsque l'angle d'incidence augmente, l'amplitude du coefficient de réflexion présente plusieurs caractéristiques :

- Une saturation initiale.
- Un pic net correspondant à l'angle critique de réflexion totale du mode longitudinal,  $\theta_L = 16^\circ$
- Une autre saturation pour  $\theta_i > 20^\circ$ .
- Une augmentation douce, qui correspond à la génération du mode transversal à  $\theta_T = 32,5^\circ$ .

- Une saturation finale avec  $|R| = 1$  correspondant au cas où aucune énergie ne peut être propagée.

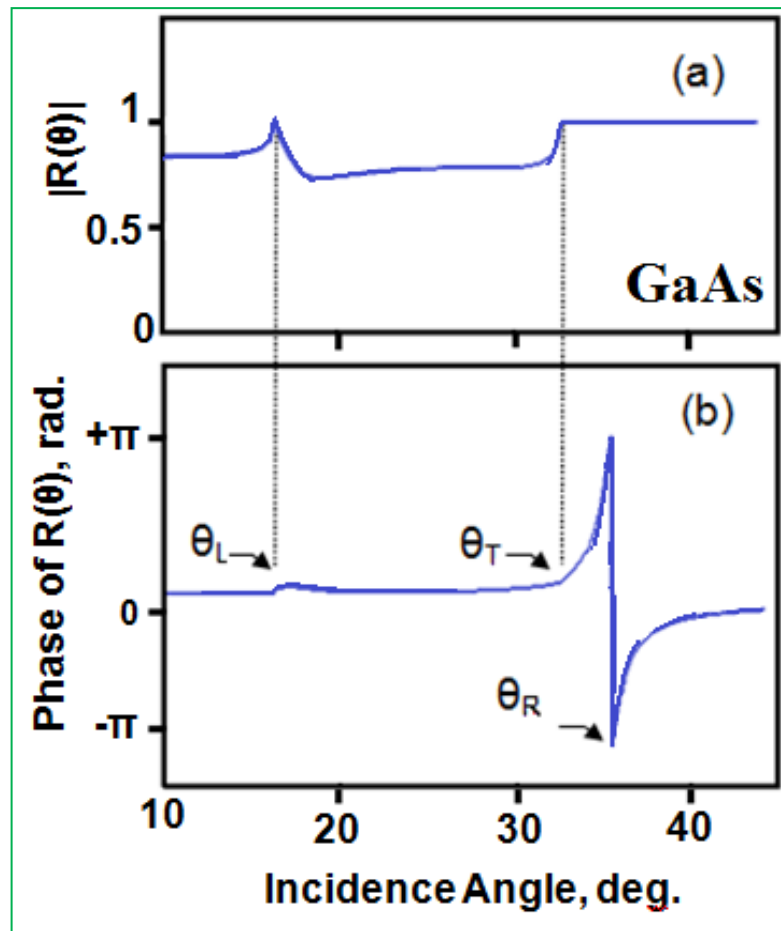


Figure II.1 Coefficient de réflexion  $R(\theta)$  du GaAs.

De plus, la dépendance de la phase de l'angle d'incidence est tracée dans figure II.1.b pour la même structure. On note bien que, lorsque l'angle d'incidence augmente, la courbe obtenue montre également plusieurs fluctuations, comme pour  $|R|$ , se produisant aux mêmes angles critiques auxquels différents modes subissent une réflexion totale: longitudinal, transversal et Rayleigh. Il convient de noter que la fluctuation la plus importante, avec une transition  $\Delta\varphi \approx 2\pi$ , se produit autour de l'angle critique de l'onde de Rayleigh ( $\theta_R = 35,4^\circ$ ).

### II.5.2 Signature Acoustique

La signature acoustique du GaAs est illustrée sur la figure II.2 en termes de la réponse  $V$  en fonction de la distance de défocalisation,  $z$ . On peut voir que la courbe présente un comportement oscillatoire et périodique dû aux interférences constructives et destructives entre les modes de propagation [20]. Ce signal est de période spatiale,  $\Delta z$ , qui représente la distance entre deux maxima ou deux minima successifs. Le  $V(z)$  donne des informations précieuses sur les caractéristiques de l'échantillon étudié ; notamment sur les vitesses des ondes acoustiques de surface, SAW, impliquées dans les phénomènes d'interférences. Dans les conditions de simulation choisies, le mode de Rayleigh est le plus dominant.

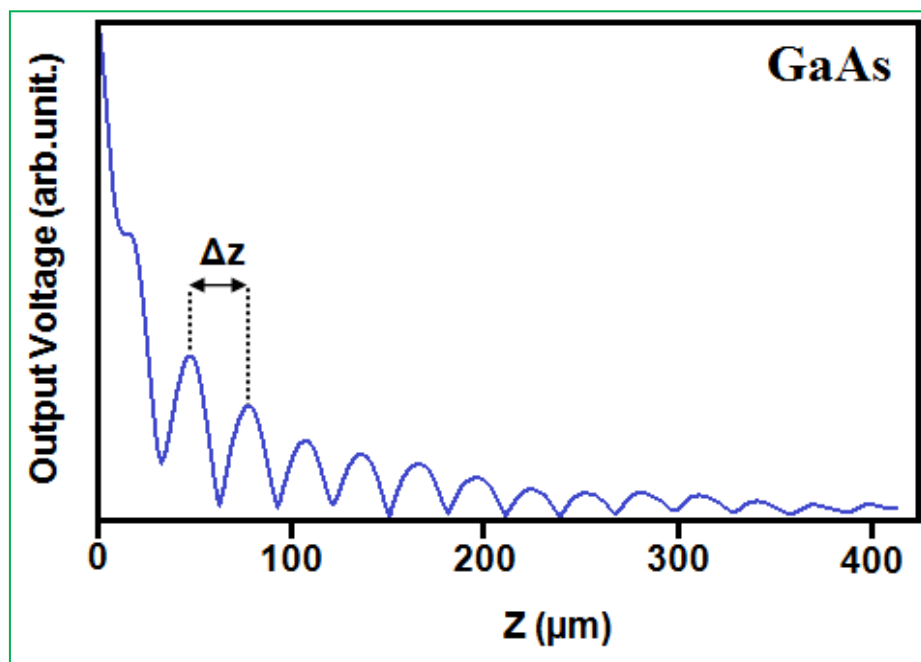


Figure II.2. Signatures acoustiques du composé GaAs.

### II.5.3 Spectres FFT

Il est possible de traiter les courbes  $V(z)$  quantitativement par la transformée de Fourier rapide, FFT. La position des différents pics sur le spectre de FFT permet avec précision la détermination de la période  $\Delta z$ , et aussi la vitesse des modes excités. Le traitement du signal  $V(z)$  du GaAs a conduit au spectre illustré par la figure II.3. On note clairement qu'il existe deux pics dans le spectre FFT de GaAs, correspondants aux deux modes: longitudinale,  $V_L$ , et de Rayleigh,  $V_R$ . La hauteur de ces pics corrélée à l'efficacité d'excitation de chacun d'eux, indique que le mode de Rayleigh est le plus dominant. Ainsi,

à partir du spectre FFT du GaAs, il est clair que le pic principal, le plus attirant, correspondant au mode de Rayleigh avec une période spatiale  $\Delta z = 29,3 \mu\text{m}$ . Quant au second pic, il correspond au mode longitudinale avec une période spatiale  $\Delta z = 134,2 \mu\text{m}$ . Par conséquent, à partir de la relation (II.21), on en déduit facilement les deux vitesses ultrasonores  $V_R = 2604 \text{ m/s}$  et  $V_L = 5364 \text{ m/s}$ . Notons que la valeur de  $V_R$  déterminée pour la première fois, inconnue dans la littérature à notre connaissance, est physiquement acceptable puisque la vitesse de Rayleigh est généralement d'environ 87 à 95 %  $V_T$  [33] ou environ la moitié de  $V_L$ . Par ailleurs, la valeur de  $V_L$  déduite via l'analyse de FFT est presque identique à celle calculée à partir de la relation (II.19); ceci confirme bien nos résultats.

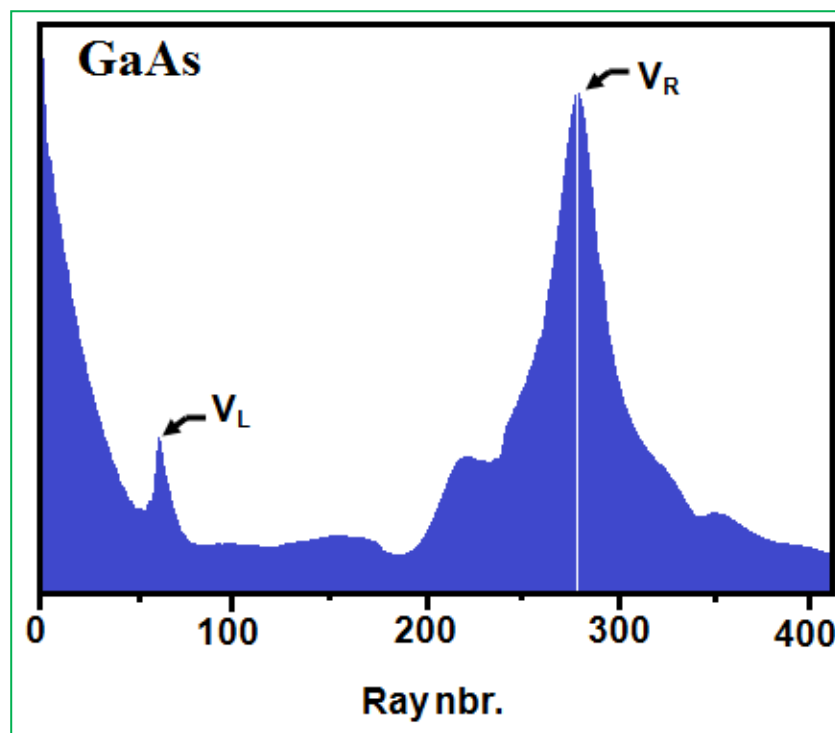


Figure II.3 Spectre de FFT du composé GaAs.

## II.6 Propriétés Élastique d'AlAs

### II.6.1 Coefficient de Réflexion

Nous avons présenté dans la figure II.4 la courbe obtenue du coefficient de réflexion,  $R(\theta)$ , en fonction de l'angle d'incidence,  $\theta_i$ , de la structure: eau/AlAs. Nous calculons indépendamment l'amplitude et la phase du coefficient de réflexion. L'amplitude est donnée sur la figure II.4.a, et la phase sur la figure II.4.b. En augmentant l'angle d'incidence  $\theta_i$ , on peut observer trois fluctuations pour l'amplitude ainsi que pour la phase.

La première fluctuation correspond à l'angle critique d'excitation des angles longitudinales,  $\theta_L$ , et la seconde en amplitude correspond à celle des ondes transversales  $\theta_T$ , au-delà de cette angle  $\theta_T$ , l'amplitude tend vers l'unité à cause de la réflexion totale de l'énergie. La dernière fluctuation de la phase correspond à l'angle critique d'excitation de l'onde de Rayleigh,  $\theta_R = 29,4^\circ$ . Cette valeur est inférieure de celle du GaAs. En plus, à une incidence proche de  $\theta_R$ , la phase subit un grand changement de  $2\pi$  et un très petit changement en  $\theta_L$ .

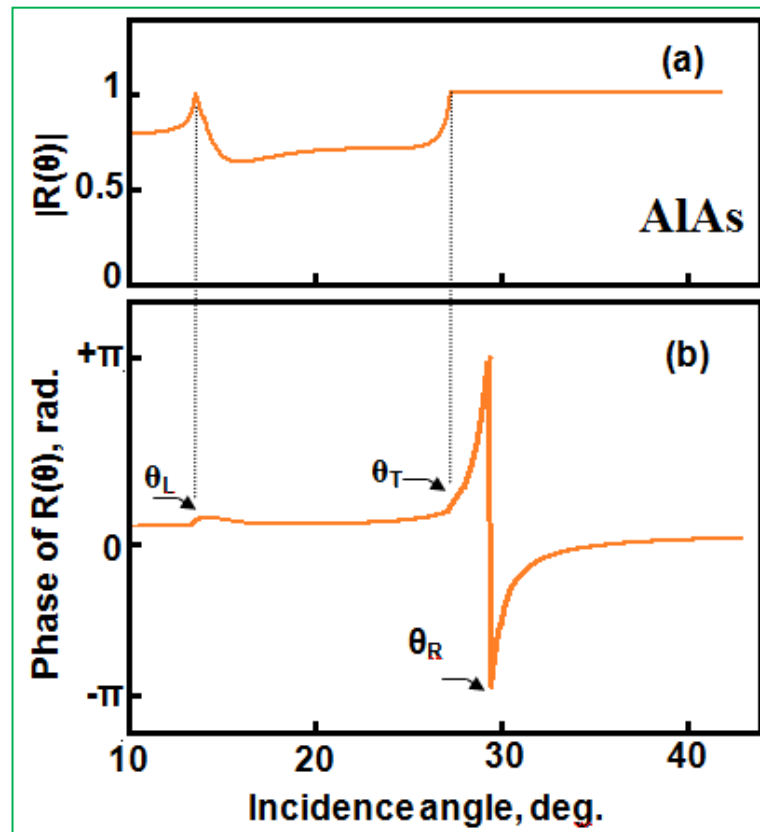


Figure II.4 Coefficient de réflexion  $R(\theta)$  de AlAs.

## II.6.2 Signature Acoustique

La signature acoustique pour l'AlAs, de structure Zinc-Blende, est représentée par la figure II.5. Les mêmes constatations que pour le GaAs peuvent être formulées. Néanmoins dans ce cas, la courbe de signature acoustique est caractérisée par une période spatiale plus grande :  $\Delta z = 42,3 \mu\text{m}$ .

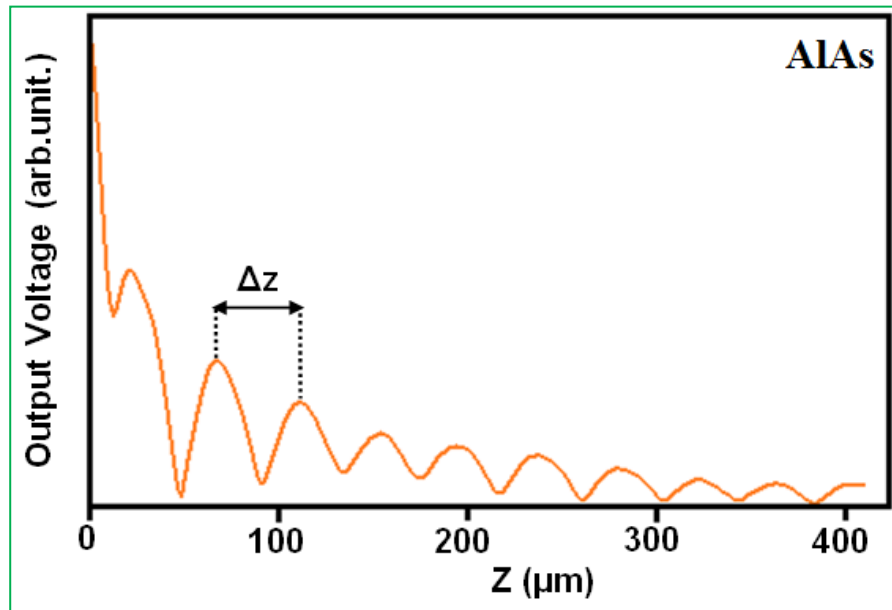


Figure II.5 Signatures acoustiques du composé AlAs.

### II.6.3 Spectres FFT

L'analyse spectrale des courbes  $V(z)$  pour le AlAs via le spectre FFT illustré dans la figure II.6. Absolument, il est montré que toute variation dans les  $V(z)$  entraîne

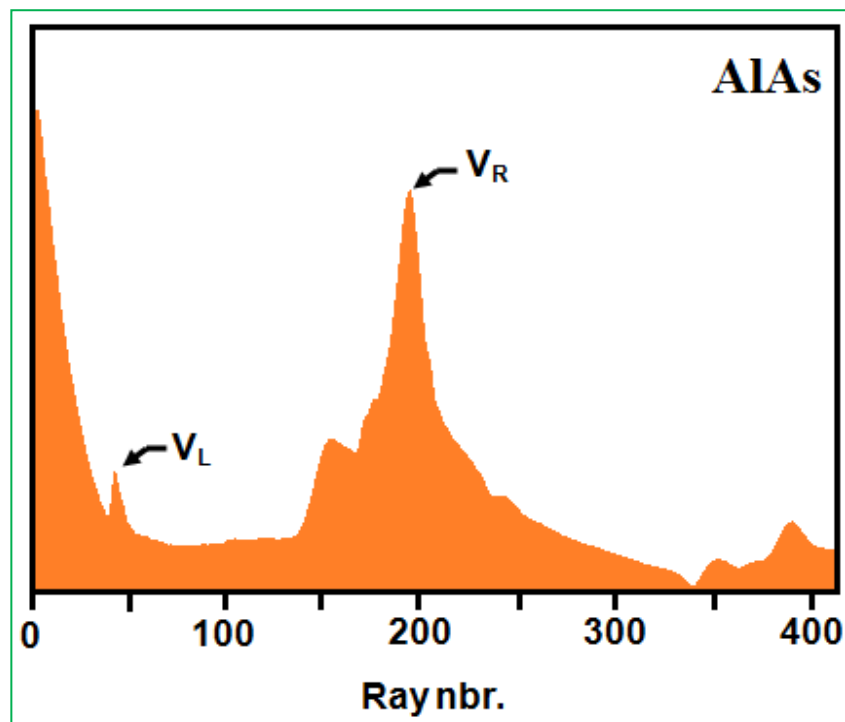


Figure II.6 Spectres FFT du composé AlAs.

nécessairement des variations dans les spectres de FFT. On observe clairement l'existence des deux pics intenses. Le pic principal représentant le mode le plus dominant qui est celui de Rayleigh dont la vitesse de propagation déduite à partir de la relation (II.21) est  $V_R = 3080$  m/s. Donc l'AlAs est plus rapide que le GaAs. Le deuxième pic représente le mode longitudinale, dont la vitesse déterminée via l'analyse par FFT est  $V_L(FFT) = 6370$  m/s et de période,  $\Delta z = 190,5$   $\mu\text{m}$ . Notons que la valeur de  $V_L$  calculer à partir de l'équation (II.19) est 6450 m/s. Ainsi, les deux valeurs sont très proche, une autre confirmation de nos résultats.

## II.6.4 Étude Comparative des Propriétés Acoustiques des Matériaux Binaires GaAs et AlAs

Pour enrichir cette étude et afin de mieux estimer les différences et les complémentarités des deux matériaux GaAs et AlAs qui constitueront le composé à étudier par la suite, AlGaAs, nous avons pensé à mener une étude comparative des propriétés de ces deux semi-conducteurs. Ainsi, la superposition des courbes des signatures acoustiques  $V(z)$  ainsi que leur spectres FFT de ces deux binaire (GaAs et AlAs) est représentée sur la figure II.7.

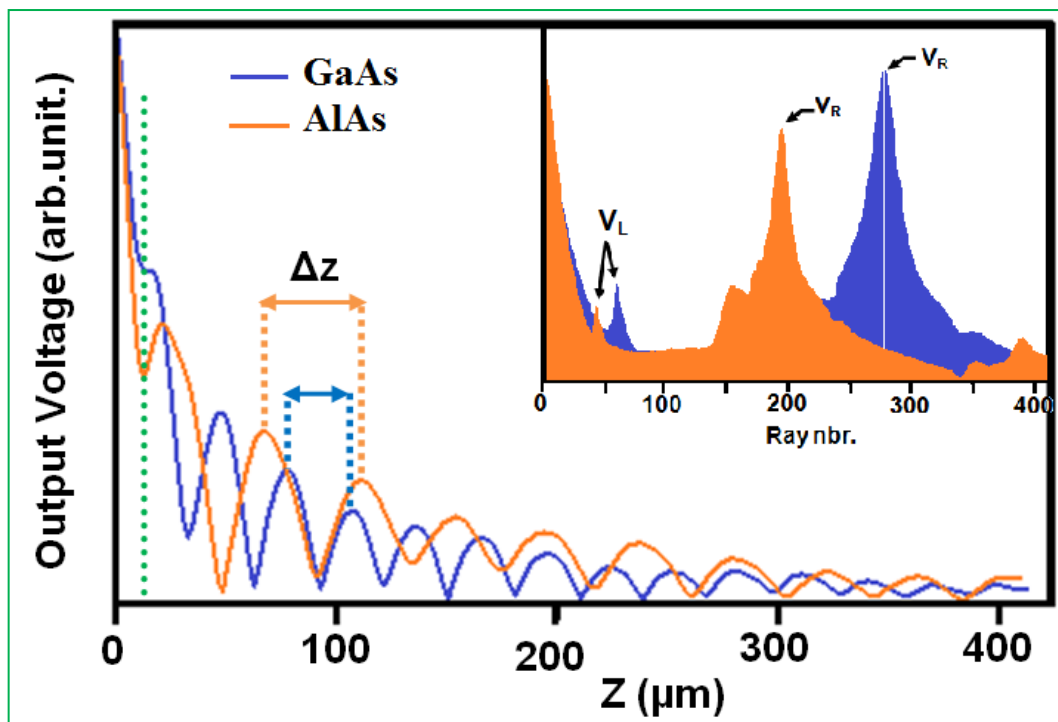


Figure II.7 Signatures acoustiques et leurs spectres FFT des composés GaAs et AlAs.



Les constatations les plus importantes sont mentionnées ci-dessous :

- L'amplitude des  $V(z)$  du GaAs est plus grande de celle de l'AlAs.
- La période  $\Delta z$  de l'AlAs est supérieure à celle du GaAs, d'où un décalage des maxima est très remarquable entre les deux signatures.
- L'efficacité de génération des modes dans le GaAs est plus importante que celle dans l'AlAs.
- Les deux modes longitudinale et celui de Rayleigh de l'AlAs apparaissent dans les spectres de FFT avant ceux du GaAs.

D'autre part, le tableau (II.2) regroupe quelques valeurs caractéristiques des deux binaires GaAs et AlAs.

Matériaux	Mode de Rayleigh			Mode longitudinal		
	$V_R$ (m/s)	$\Delta z$ ( $\mu\text{m}$ )	$\theta_R$ ( $^\circ$ )	$V_L$ (m/s)	$\Delta z$ ( $\mu\text{m}$ )	$\theta_L$ ( $^\circ$ )
<b>GaAs</b>	2604	29,3	35,4	5364	134,2	16,2
<b>AlAs</b>	3080	42,3	29,4	6370	190,5	13,6

**Tableau II.2** Caractéristiques des deux binaires GaAs et AlAs.

Il ressort clairement que l'AlAs est plus rapide que le GaAs. La période spatiale des deux modes est plus grande pour l'AlAs. Quant aux angles critiques, aussi bien du mode de Rayleigh que du longitudinale du matériau GaAs sont plus grands que ceux de l'AlAs.

## II.7 Influence de la Fraction d'Al et Propriétés de l' $Al_xGa_{1-x}As$

L'étude du comportement élastique du ternaire  $Al_xGa_{1-x}As$  en fonction de la fraction,  $x$ , d'aluminium est l'un des objectifs principaux dans ce travail. En effet, l'hétérostructure AlGaAs/GaAs est considérée comme le choix le plus courant à utiliser dans de nombreux dispositifs à haute vitesse et haute fréquence [34]. En réalité, la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ , dont les caractéristiques varient principalement avec la fraction d'Al,  $x$ , constitue un repère d'un grand nombre d'applications technologique telle que, cellules solaires [35-39], photo-détecteur [40], photodiodes à avalanche [41], puits quantiques triangulaires simples et doubles, TQW, [42], laser à puits quantique unique pour les

systèmes de communication optique [43], cathodes à haut rendement dans les dispositifs, PETE (photon-enhanced thermionic emission) [44], systèmes Thue-Morse à puits quantiques multiples (Thue-Morse multiple-quantum-well systems), TM-MQWs, [45], etc.

Par ailleurs, la détermination de la dépendance de la fraction d'Al sur les propriétés élastiques des alliages semi-conducteurs AlAs et GaAs est très importante pour diverses applications spécifiques. Par exemple, la conception de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$  avec une fraction variante de 0 à 0,45, produit des propriétés optiques et électroniques de qualité [36, 46-48]. Alors que la fraction  $Al_{0.7}Ga_{0.3}As$  présente plus d'avantages pour un meilleur choix dans les applications de biodétection [49].

Afin de mieux comprendre ce comportement, il est important de connaître tout d'abord les propriétés élastiques de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$  avec,  $0 \leq x \leq 1$ . Ce large spectre de composition en fraction d'Al ouvre davantage de voies d'ingénierie et optimise la composition de ce matériau ternaire pour des applications technologiques spécifiques. Ainsi, pour valeur de  $x$ , nous déterminons le coefficient de réflexion,  $R(\theta)$ , la signature acoustique,  $V(z)$ , son spectre de FFT, ainsi les vitesses ultrasonores des modes de propagation mis en jeu.

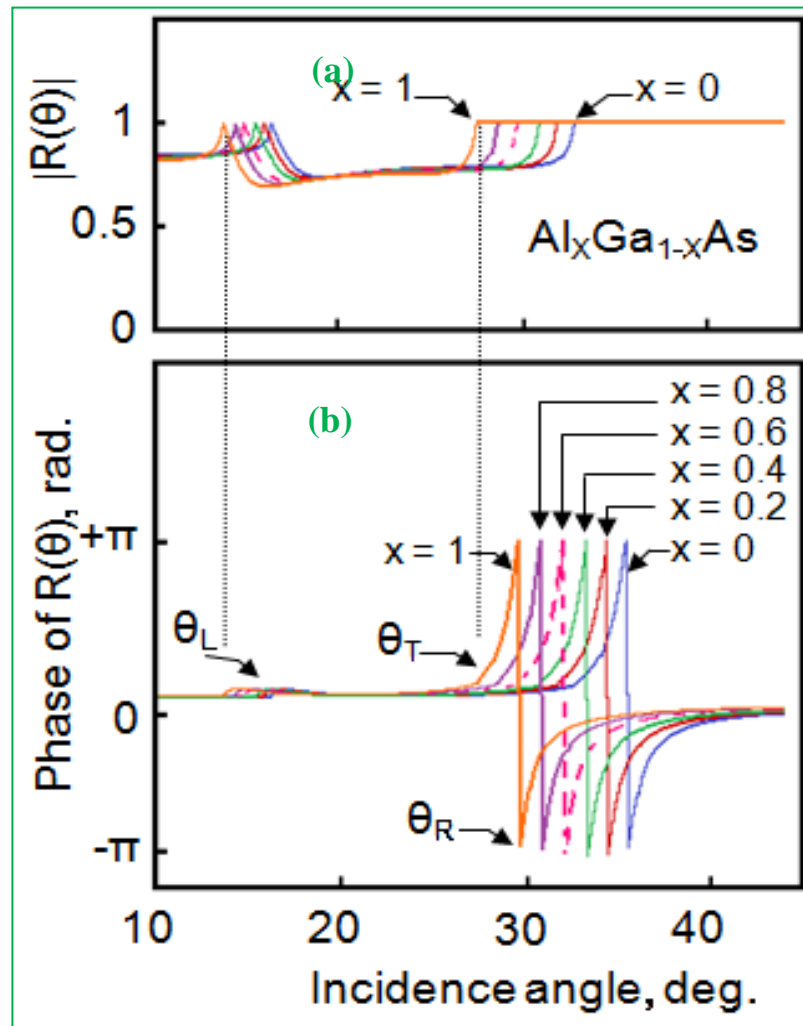
## II.8 Influence de la Fraction d'Al sur le Coefficient de Réflexion

### II.8.1 Étude de la Fonction Complexe $R(\theta)$

Le coefficient de réflexion joue un rôle très important dans la détermination des signatures acoustiques ainsi que des spectres FFT. Aussi, il permet d'obtenir des informations importantes sur les angles critiques des modes de fuites qui apparaissent sous forme d'un changement aussi bien dans la phase que dans l'amplitude de  $R(\theta)$ . Cette fonction complexe qui admet un module et une phase dépend fortement des conditions aux limites à l'interface liquide de couplage/échantillon: impédance  $Z$ , densité  $\rho$ , angle d'incidence  $\theta_i$ , vitesses des différents modes de propagation, etc.

Nous avons étudié l'influence de la fraction d'Al sur les coefficients de réflexion  $R(\theta)$  pour  $x$  variant de 0 à 1. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure II.8 qui illustre l'influence de l'augmentation de la fraction d'Al,  $x$ , sur l'amplitude (Fig. II.8.a) et la phase (Fig. II.8.b) en fonction de l'angle d'incidence de l'alliage  $Al_xGa_{1-x}As$  pour certaines concentrations typiques ( $x = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  et 1). En outre, pour plus de clarté, nous

avons séparé l'amplitude de la phase. De même, les courbes sont volontairement superposées afin de mettre en évidence leurs différences.



**Figure II.8** Variation de l'amplitude (a) et de la phase (b) du coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence pour la structure  $Al_xGa_{1-x}As$  pour  $0 \leq x \leq 1$ .

Il est clair que pour chaque fraction d'Al, on observe qu'il existe un changement aussi bien de l'amplitude que de la phase via des fluctuations, au niveau des angles critiques : longitudinal, transversal et celui de Rayleigh. Notons que pour les modules, ces variations se terminent toutes par une saturation,  $|R(\theta)| = 1$ , correspondante à une réflexion totale de l'énergie. Nos investigations montrent que l'allure générale des variations de  $R(\theta)$  de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$  est fortement influencée par la fraction d'aluminiums  $x$ . En augmentant la fraction d'Al de 0 à 1, on remarque bien des changements aussi bien pour la phase que pour l'amplitude et des angles critiques décalés vers les petites valeurs des angles d'incidence.

### II.8.2 Influence sur les Angles Critiques

L'évolution du coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence (Fig. II.8.b), permet d'obtenir des informations importantes sur les angles critiques de réflexion des modes de surface ayant leur propre vitesse caractéristique. Rappelons que chaque mode excité apparaît donc sous forme d'un changement dans la phase et le module de  $R(\theta)$ . Ces changements sont accentués particulièrement au niveau des angles critiques. De plus, au fur et à mesure que la fraction d'Al augmente ( $x = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  et  $1$ ), on remarque que tous les angles critiques se déplacent vers des valeurs inférieure c.à.d. à des angles d'incidence plus petit. Par conséquent, l'augmentation de la fraction d'Al conduit à la diminution de tous les angles critiques:  $\theta_L$ ,  $\theta_T$ , et  $\theta_R$ . Afin de mieux évaluer les différences, nous regroupons dans le tableau (II.3) les valeurs des trois angles critiques à plusieurs fraction  $x= 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  et  $1$ . Notons que, ces valeurs des angles critiques  $\theta_L$ ,  $\theta_T$  et  $\theta_R$ , sont déterminées (i) à partir du coefficient de réflexion et (ii) via la loi de « *Snell-Descarte* » suivante:

$$\theta_c = \arcsin \frac{v_{liq}}{v_c} \quad (II.23)$$

Avec,  $C= L, T$ , ou  $R$ , correspondant respectivement aux modes longitudinale, transversale, et de Rayleigh. Il est clair que la différence entre les valeurs de tous les angles critiques, quel que soit  $x$  ou le mode considéré, ne dépasse pas 63 %. Ce résultat confirme une fois de plus la précision des résultats obtenus.

Matériau	GaAs	$Al_xGa_{1-x}As$				AlAs
$x$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$1$
$\theta_C$ (deg)						
$\theta_L$	16,0	15,6	15,0	14,5	14,0	13,0
$\theta_T$	32,5	31,5	30,0	29,0	28,0	27,0
$\theta_R$	35,4	34,0	33,0	31,5	30,0	29,0

Tableau II.3 Angles critiques de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ .

## II.9 Effets de la Fraction d'Al sur les Signatures Acoustiques

### II.9.1 Mise en Évidence

Les courbes des signatures acoustiques,  $V(z)$ , obtenues à  $f = 140$  MHz et  $\theta_{\text{lentille}} = 50^\circ$  pour la structure eau/ $Al_xGa_{1-x}As$  à différentes fraction d'Al sont illustrées sur la figure II.9.a avec leurs spectres FFT figure II.9.b, respectivement pour des concentrations typiques d'Al :  $x = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  et 1. Toutefois, pour plus de clarté les courbes  $V(z)$  habituellement superposées, ont été décalées vers le haut. On constate que toutes les courbes  $V(z)$  présentent une valeur maximale au point focal ( $z = 0$   $\mu\text{m}$ ) suivie d'un comportement oscillatoire avec des périodes  $\Delta z$  caractéristiques dues à l'interférence constructive et destructive des différents modes de propagation [20].

De plus, lorsque la fraction d'aluminium augmente de 0 jusqu'à l'unité, on remarque que la période  $\Delta z$  augmente de 29  $\mu\text{m}$  à 42  $\mu\text{m}$ . Ces variations de  $V(z)$  sont mieux mises en évidence par les spectres FFT insérés à la figure II.9.b. Dans ces derniers, on note un net déplacement du rayon principal vers des valeurs de fréquences spatiales les plus élevées dans les conditions de simulation actuelle d'un SAM de fonctionnement normal. Par ailleurs, pour chaque fraction d'Al, il est important de souligner qu'il existe deux pics correspondants respectivement aux modes longitudinales et celui de Rayleigh dont l'intensité est plus grande. En outre, l'augmentation de la fraction d'Al de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$  provoque le décalage des pics principaux vers les fréquences les plus élevées conduisant à un élargissement de la période spatiale. Ce phénomène fait l'objet du paragraphe suivant.

### II.9.2 Variation de la Période Spatiale

À partir des résultats présentés sur la figure II.9, nous avons constaté que la période spatiale,  $\Delta z$ , des signaux  $V(z)$  de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$  sont fortement influencés par la fraction d'Al  $x$ . Ainsi, quand  $x$  varie de 0 à 1; la période  $\Delta z$  augmente de 29,3 à 42,3  $\mu\text{m}$  pour le mode de Rayleigh. Également pour le mode longitudinale,  $\Delta z$  subit une croissance de 134,2 à 190,5  $\mu\text{m}$  quand la fraction  $x$  passe de 0 à 1. Ces résultats sont d'une importance capitale pour divers applications technologiques.

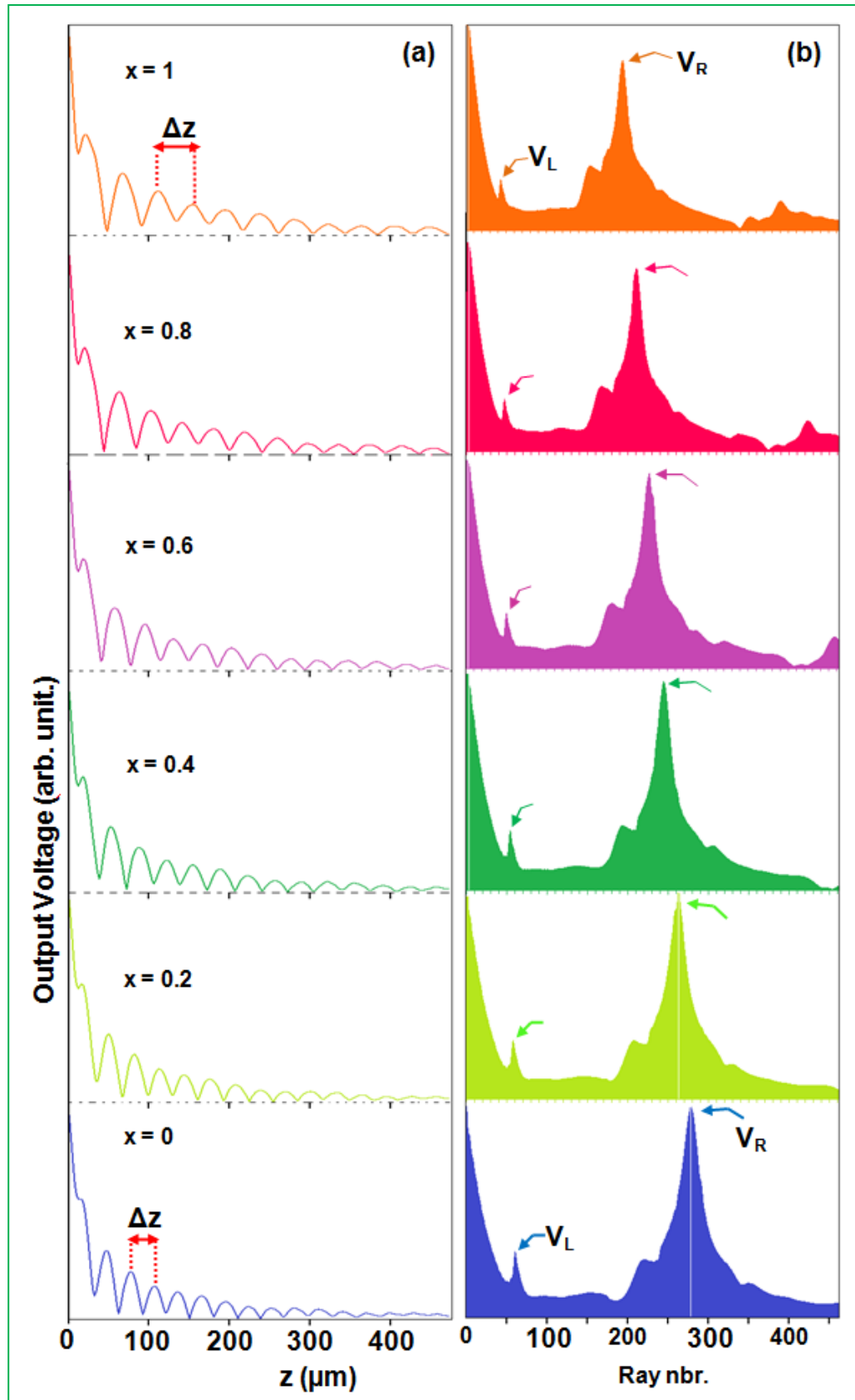


Figure II.9 Signatures acoustiques et spectres FFT du composé  $Al_xGa_{1-x}As$  à différentes fraction d'Al.

Par ailleurs, le tableau (II.4) regroupe les valeurs de la période,  $\Delta z$ , du mode longitudinal et celui de Rayleigh en fonction de la fraction d'Al de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ . La première remarque qu'on peut faire est que la période des deux modes subit une évolution relativement proportionnelle à la vitesse de mode de propagation considéré. Autrement dit, la valeur de la période du mode Rayleigh passe de 29,3  $\mu m$  à 42,3  $\mu m$ , et pour le mode longitudinale  $\Delta z$  passe de 134,2  $\mu m$  à 190,5  $\mu m$ .

Fraction d'Al, x		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Mode longitudinale	$\Delta z$ ( $\mu m$ )	134,2	141,2	151,7	162,2	174,2	190,5
Mode de Rayleigh		29,3	31,2	34,1	36,4	38,8	42,3

**Tableau II.4** Valeurs de  $\Delta z$  du mode longitudinal et celui de Rayleigh en fonction de la fraction d'Al de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ .

## II.10 Influence de la Fraction d'Al sur les Vitesses des SAWs

Les vitesses de propagation des ondes ultrasonores longitudinales  $V_L$ , et de Rayleigh,  $V_R$ , sont obtenues via l'analyse de la réponse de signature acoustique  $V(z)$  par la transformée de Fourier rapide FFT, qui est une méthode spectrale utilisée pour le traitement des signaux. Cette technique spectrale permet la détermination de la période spatial de ces signaux et ainsi la vitesse des différents modes de propagations [20].

### II.10.1 Vitesse de Rayleigh

Les ondes de Rayleigh sont des ondes de surface composées par la superposition des ondes longitudinales et transversales se propageant le long de la surface libre avec une vitesse de phase commune. Depuis leur découverte en 1885 [27, 50-51], les ondes de Rayleigh restent d'un intérêt considérable grâce à leur utilisation dans la détection des défauts de surface et dans le test ultrasonore non destructif des matériaux. Par ailleurs, plusieurs dispositifs utilisent les ondes de Rayleigh tels que : lignes à retard, oscillateurs, résonateurs, filtres, capteurs, et éléments de traitement du signal.

La détermination leur vitesse de propagation a été effectuée par simulation théorique réalisée dans le cas d'un microscope acoustique, fonctionnant dans les conditions normale, favorisant justement l'excitation de ce mode. L'analyse des spectres de FFT (figure II.9.b) de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$  pour différentes fraction d'Al ( $x = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8$  et 1) permettent l'évaluation de la vitesse de Rayleigh,  $V_R$ . Il est clair que le décalage des raies principales dans les spectres de FFT entraine une variation de la vitesse  $V_R$ .

Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure II.10 en termes de  $V_R$  en fonction de la fraction d'Al. Ainsi, au fur à mesure que la fraction d'Al augmente de 0 à 1, on note une augmentation rapide de la vitesse de Rayleigh  $V_R$ . Cette variation peut se justifier par la structure cristalline d' $Al_xGa_{1-x}As$  qui devient plus compacte. Notamment, la vitesse de Rayleigh subit une augmentation de celle du GaAs pour  $x=0$  ( $V_R= 2604$  m/s), à celle de AlAs pour  $x=1$  ( $V_R= 3080$  m/s). En conséquence, la vitesse de Rayleigh est une grandeur intrinsèque du matériau.

En plus, afin d'enrichir cette étude, nous portons sur le même graphe ( $\blacktriangle\blacktriangle\blacktriangle\blacktriangle$ ) les valeurs de  $V_R$  calculées à partir de la relation de « Viktorov » [31] (II.22). Un bon accord est clairement obtenu. Il convient de noter, qu'à notre connaissance, il n'y a pas d'investigation expérimentale d'un tel comportement pour les vitesses de Rayleigh de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ .

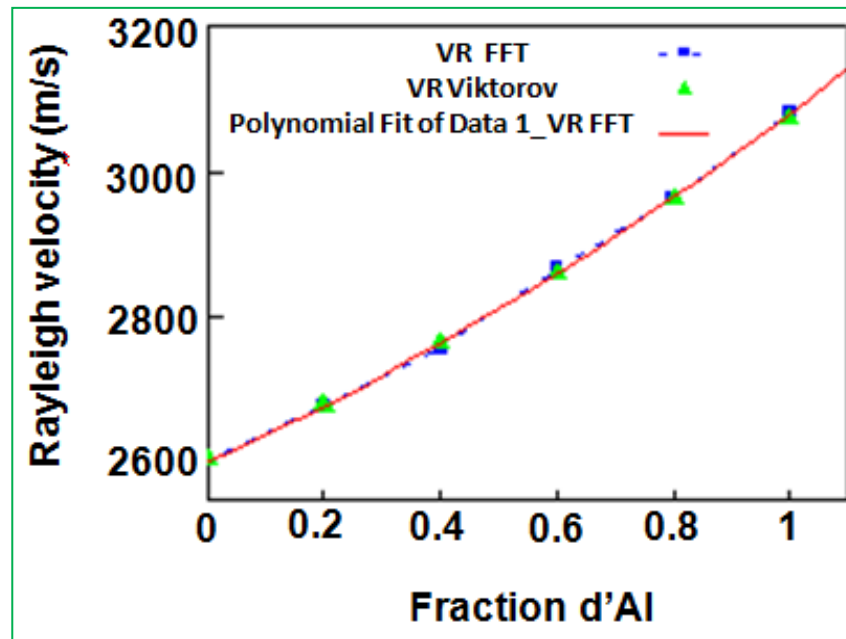
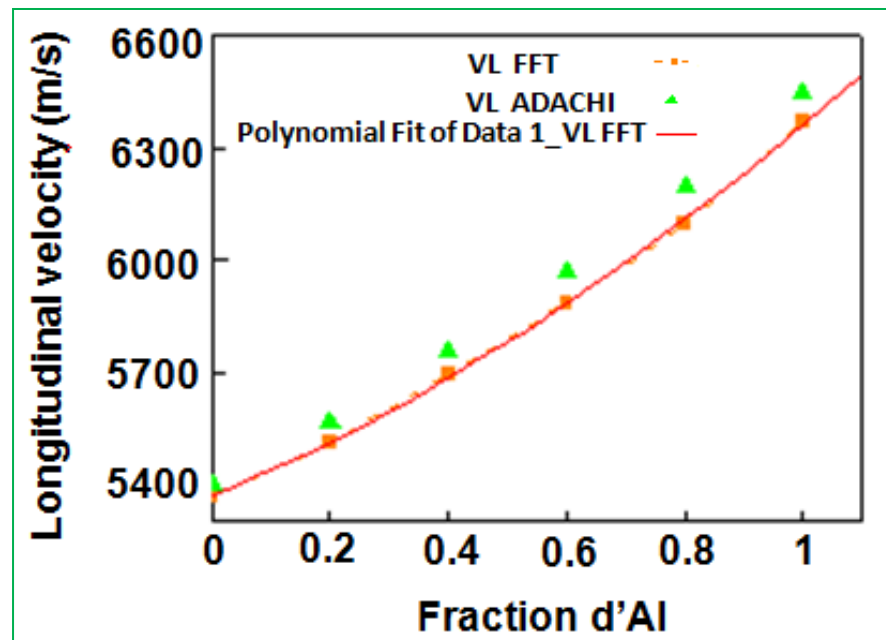


Figure II.10 Évolution de la Vitesse de Rayleigh en fonction de la fraction d'Al du composé  $Al_xGa_{1-x}As$ .



## II.10.2 Vitesse des Ondes Longitudinales

Les ondes longitudinales, sont des ondes ultrasonores caractérisées par un déplacement des particules parallèle à la direction de propagation. Ce sont des ondes de surface de compression appelées également "skimming" dont l'importance est capitale pour la détermination des propriétés élastiques des matériaux. Notamment, leur vitesse de propagation qui peut être déterminée via les spectres FFT des signatures acoustiques (figure II.9.b). Évidemment, nous avons calculé les vitesses,  $V_L$ , correspondantes au mode longitudinale en fonction de la fraction d'Al de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$  sous les mêmes conditions que précédemment. Les résultats obtenus sont représentés dans la figure II.11 (■ ■ ■ ■).

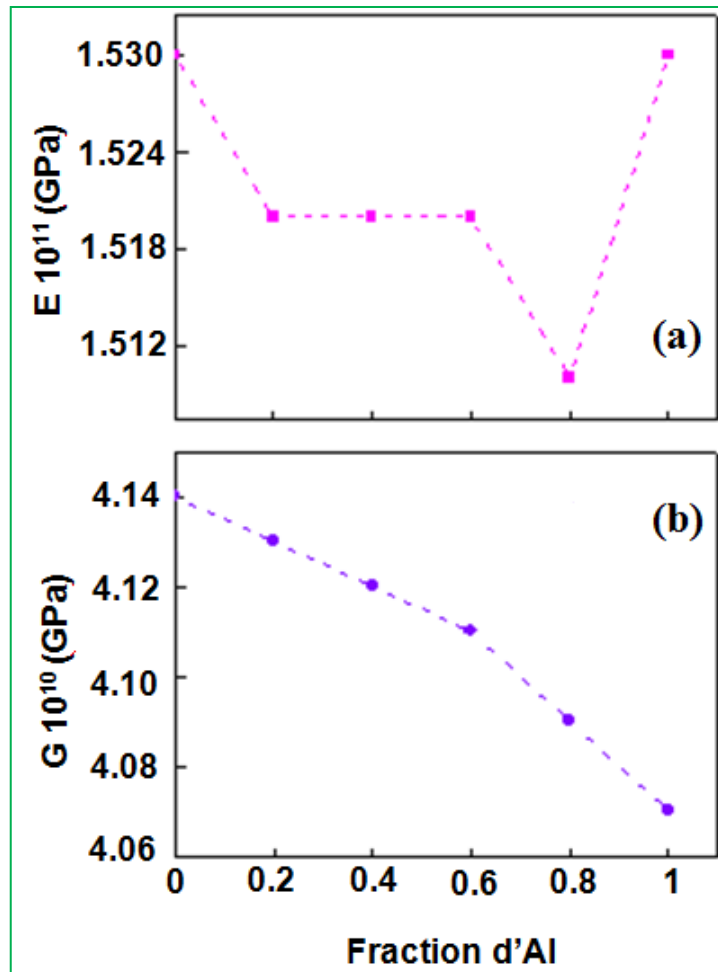


**Figure II.11** Vitesse longitudinale du composé  $Al_xGa_{1-x}As$  à différentes fraction d'Al.

Pour une étude plus complète, nous avons également calculé  $V_L$  à partir de la relation (II.19). Les résultats obtenus sont portés sur la même figure II.11 (▲ ▲ ▲ ▲). Il est clair que la vitesse longitudinale augmente de celle du GaAs (5364 m/s) à celle de l'AlAs (6370 m/s) lorsque la fraction d'Al augmente de zéro à l'unité. Ce comportement est très similaire à celui déduit des données rapportées dans la littérature [19].

Par Ailleurs, les vitesses des ondes longitudinales,  $V_{L(FFT)}$  et celle de transversales  $V_T$ , sont reliées aux modules élastiques, module de Young,  $E$ , et celui de cisaillement,  $G$ , par les formules (II.6) et (II.7). En plus, le module d'Young est un paramètre mécanique fondamental pour prédire l'influence de la fraction d'Al sur la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ . Pour

cela, nous avons étudié l'influence de  $x$  sur ces modules élastiques. Les résultats sont illustrés sur la figure II.12.



**Figure II.12** Variation des modules de Young et de cisaillement en fonction de la fraction d'Al de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ .

### II.10.3 Quantification

Les similitudes des variations des vitesses  $V_R$  et  $V_L$  avec la fraction d'Al de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$  indiquent le même mécanisme de propagation de SAW. Autrement dit, ces vitesses subissent une augmentation proportionnelle à l'évolution de la fraction d'Al dans la gamme de  $x$  allant de 0 à 1. En utilisant une méthode d'optimisation, le lissage des courbes, des figures II.10 et II.11, nous avons déduit une relation polynomiale de la forme:

$$Y = A + B_1 x + B_2 x^2 \quad (II.24)$$

Notamment, les variations des vitesses du mode longitudinal et celui de Rayleigh en fonction de la fraction d'Al de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$  sont respectivement présentées par les formules suivant:

$$V_L(m/s) = 5377 + 664,571 x + 317,857x^2 \quad (II.25)$$

$$V_R(m/s) = 2603 + 356,6 x + 121,4x^2 \quad (II.26)$$

D'après les relations (II.19) et (II.25) les vitesses longitudinales calculées via les FFT sont en accord raisonnable avec celles données en littérature.

## II.11 Conclusions

Parmi les techniques modernes de contrôle de qualité des matériaux, nous citons la microscopie acoustique qui se présente comme un moyen potentiel dans la micro-caractérisation non destructive. Son principe de fonctionnement est basé sur l'émission des ondes ultrasonores par un générateur et la réception de ces mêmes ondes réfléchies, en balayant l'échantillon considéré. C'est justement cette technique que nous avons choisie afin de mener à bien nos investigations.

Dans ce chapitre, après avoir expliqué la méthodologie et donné les conditions de simulation pour le présent travail, nous avons déterminé les propriétés élastiques des matériaux GaAs, AlAs ainsi que de leurs alliages ternaires  $Al_xGa_{1-x}As$ . Parmi les paramètres étudiés nous citons : les coefficients de réflexion, les angles critiques ( $\theta_T$ ,  $\theta_L$ , et  $\theta_R$ ) les signatures acoustiques et leurs traitements de FFT. Ces paramètres ont été étudiés pour chaque matériau : GaAs, AlAs, et l' $Al_xGa_{1-x}As$  et pour chaque fraction d'Al. Dans une deuxième étape, nous nous sommes intéressés aux périodes spatiales des  $V(z)$ , les vitesses de propagation du mode de Rayleigh,  $V_R$ , ainsi que celle mode longitudinale. Enfin, nous avons également calculé les modules d'élasticité : module de Young,  $E$ , et celui de cisaillement,  $G$ , et étudier l'effet de l'augmentation de la fraction d'Al (dans la gamme de 0 jusque à l'unité) sur ces modules.

L'influence de la fraction d'Al sur la vitesse de Rayleigh et celle longitudinale à été quantifiée par une relation polynomiale de la forme:

$$Y = A + B_1 x + B_2 x^2$$

Nous avons constaté que la fraction d'aluminium joue un rôle considérable sur ces propriétés acoustiques, où les vitesses de Rayleigh et longitudinales deviennent plus grandes lors de l'augmentation de la teneur d'Al. En effet,  $V_R$  augmente de 2604 à 3080 m/s, et  $V_L$  augmente de 5364 à 6370 m/s lorsque  $x$  varie de 0 à 1. Ces vitesses

acoustiques ont un comportement non linéaire par rapport à la composition d'Al présentant ainsi un paramètre de flexion. Par ailleurs, la relation de « *Viktorov* » confirme bien nos résultats relatifs à la vitesse de Rayleigh et obtenus pour la première fois. Aussi, les vitesses longitudinales calculées via les FFT sont en accord raisonnable avec celles données en littérature.

***CHAPITRE III***

***INFLUENCE DE L'ANISOTROPIE SUR***

***LES PROPRIÉTÉS ACOUSTIQUES DES***

***COMPOSÉS GaAs, AlAs, ET Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As***

---

### III.1 Introduction

En conséquence de leur position actuelle et potentielle dans plusieurs domaines technologiques industriels, pour l'amélioration des propriétés du dispositif électronique et optoélectronique innovants [1-2], les propriétés élastiques des structures couche/substrat ont attiré l'attention de plusieurs chercheurs [3-4]. Ainsi, pour analyser ces structures dont le comportement élastique est souvent dispersif, les méthodes quantitatives sont très utiles [5-6]. D'autre part, les ondes ultrasonores constituent une approche physique bien adaptée pour l'évaluation non destructive des paramètres mécaniques des composés semi-conducteurs. Mais le comportement des ondes ultrasonores est souvent compliqué par la présence de l'anisotropie des matériaux.

Par ailleurs, plusieurs études se sont particulièrement intéressées à l'évaluation des modules d'élasticité et leur quantification en fonction de l'épaisseur des matériaux constituant les films, par la technique d'analyse spectrale des ondes de Rayleigh en tant qu'outil d'investigation des structures couches minces/substrat [7-8]. De même, les composants fabriqués à partir de semi-conducteurs III-V, sont devenus un domaine technologique très attractif dû à la possibilité de produire des matériaux avec des propriétés ajustables [9]. De plus, la recherche a montré que certaines modifications de certains paramètres structuraux tels que la fraction molaire, l'épaisseur de la couche peut entraîner une évolution des caractéristiques [10-12].

À cet effet, la technique de micro caractérisation quantitative via SAM [13] joue un rôle capital pour la détermination des propriétés élastiques des structures couche/substrat, vitesse de propagation des modes de surface, coefficient de réflexion, signatures acoustiques, constantes élastiques, épaisseur des couches minces etc. Notamment, la séparation des propriétés élastiques des couches minces de celles du substrat sous l'effet de l'anisotropie fait l'objet de nos investigations. Ainsi, nous avons opté, dans cette investigations acoustique, de faire varier la fraction d'Aluminiums de 0 à 1 pour orienter des voies d'ingénierie et optimiser des dispositifs dont la constitution fait intervenir cette couche déposée sur d'autre substrat, dans un vaste domaine d'applications technologiques.

En outre, les propriétés des matériaux pourraient être différentes selon l'orientation cristallographique. Particulièrement, les changements des caractéristiques selon différentes directions cristallographiques. La détermination de ces changements est nécessaire pour l'amélioration des techniques de fabrication des dispositifs et pour faire

évoluer leurs applications dans divers domaines technologiques industrielles. En effet, l'analyse de la dispersion de la vitesse de propagation des ondes de Rayleigh permet de différencier les structures d' $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  en différentes orientations cristallographiques et de mettre en évidence l'évolution de leurs propriétés élastiques en fonction de l'épaisseur normalisée  $d/\lambda_T$ . En réalité, les fissures et la dégradation des structures apparaissent généralement à la surface; du fait que c'est cette dernière qui souffre le plus des conséquences de la fatigue thermique, de la pression mécaniques, de l'attaque des ions, etc. Par conséquent, les courbes de dispersions des vitesses de propagations des SAW pour le système  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  sur un intervalle d'épaisseur, normalisée à la longueur d'onde transversale de la couche  $Al_xGa_{1-x}As$ ,  $d/\lambda_T$ , allant de 0 à 2 seront étudiées afin de déterminer les paramètres acoustiques influençant l'épaisseur critique de la couche d' $Al_xGa_{1-x}As$  à laquelle son comportement élastique sera dissocié de celui du substrat.

Les simulations théoriques présentées dans ce chapitre ont été effectuées dans les conditions normales d'un microscope acoustique SAM fonctionnant en mode de réflexion. L'effet de l'anisotropie et l'épaisseur de la couche normalisée à la longueur d'onde transversale,  $d/\lambda_T$ , sur les propriétés acoustiques du matériau massif  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ , et de la structure  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$  à été réalisées et bien analysées.

## III.2 Anisotropie

L'anisotropie est la caractéristique d'un matériau de présenter des variations de ses propriétés mécaniques, électriques, optiques, thermiques, etc. selon différentes directions cristallographiques. En fait, les matériaux anisotropes ont suscité un grand intérêt pour la recherche en raison de leurs nombreuses applications dans l'aérospatiale, la détection, la robotique douce et l'ingénierie tissulaire [14], etc.

L'anisotropie élastique des matériaux joue non seulement un rôle essentiel pour remplir leurs fonctions, mais affecte également d'autres propriétés des matériaux, telles que les transformations de phase [15], la propagation des fissures [16], la déformation plastique la résistance à l'indentation [17], et la ténacité [18]. Ainsi, la mesure du degré d'anisotropie élastique est fondamentale dans leur caractérisation.

L'anisotropie élastique a une implication importante en science industrielle car elle renseigne sur la possibilité de formation de microfissures ou des défauts structuraux. Elle

est caractérisée par le facteur d'anisotropie élastique de « Zener », A, [19] exprimé par la relation III.1 :

$$A = \frac{2C_{44}}{(C_{11}-C_{12})} \quad (\text{III.1})$$

Ce facteur est fortement lié aux constantes élastiques C<sub>11</sub>, C<sub>12</sub>, et C<sub>44</sub>. Par conséquent, il s'ajoute aux autres paramètres physiques intéressants en corrélation avec propriétés élastiques des solides. De ce fait, connaissant les C<sub>ij</sub>, il devient facile de le déterminer. Notons que le facteur d'anisotropie du ternaire Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As à 300 k est exprimé en fonctions de la fraction d'Aluminium, par la relation linéaire suivante [20] :

$$A = 0,55 - 0,01 x \quad (\text{III.2})$$

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux matériaux de base le GaAs et l'AlAs avant d'étudier le composé Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As. Les trois orientations cristallographiques; [100], [110], et [111] seront prises en considération.

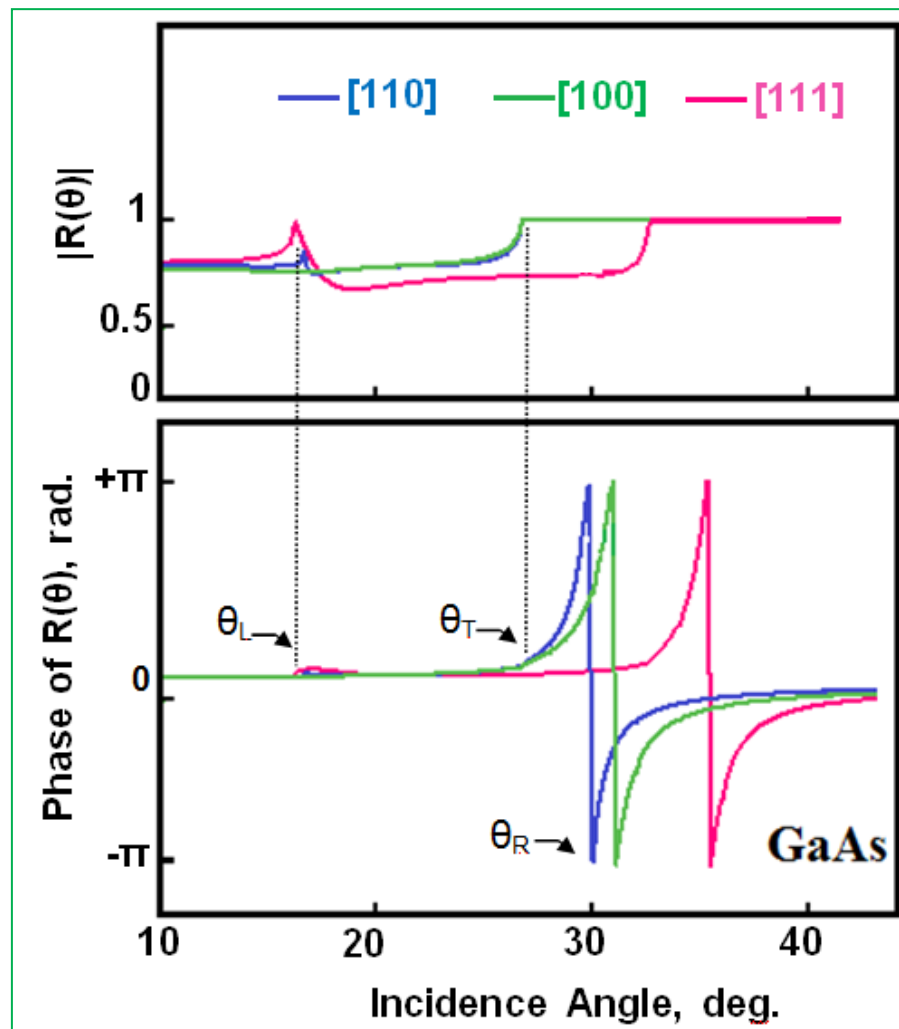
## III.3 Influence de l'Anisotropie sur les Propriétés du GaAs

### III.3.1 Coefficient de Réflexion

A l'interface liquide de couplage/substrat, le coefficient de réflexion, R (θ), dépend des conditions aux limites : densité, ρ, angle d'incidence, θ<sub>i</sub>, impédance, Z, et des vitesses de propagation des différents modes [21-24]. C'est une fonction complexe qui admet une amplitude et une phase dont la réflexion totale est obtenue pour |R (θ)| = 1. Le coefficient de réflexion de GaAs est calculé pour les trois directions [100], [110] et [111]. La figure III.1 illustre les résultats caractéristiques de l'amplitude et de la phase en fonction de l'angle d'incidence pour le GaAs pour différentes orientations cristallographiques. En augmentant l'angle d'incidence, on constate des changements aussi bien pour la phase que pour l'amplitude, la première fluctuation correspond à l'angle critique des ondes d'excitation longitudinales, θ<sub>L</sub>, et la seconde correspond à celle des ondes transversales, θ<sub>T</sub>. A partir de θ<sub>T</sub> l'amplitude tend vers l'unité menant à une réflexion totale de l'énergie. Par ailleurs, la plus importante fluctuation en phase correspondante à celle de l'angle critique du mode de Rayleigh, θ<sub>R</sub>. Nos investigations montrent que l'allure générale des variations de R(θ) est fortement influencée par l'anisotropie. Le degré de fluctuations de la phase et de l'amplitude, pour ces différentes directions cristallographiques et pour chaque angle



critique, indique l'efficacité de génération des différents modes. Notons qu'aussi bien le mode longitudinal que celui de Rayleigh sont excités tout d'abord pour la direction [110], suivie par la direction [100] et enfin la direction [111].



**Figure III.1** Amplitudes et phase des coefficients de réflexion pour le GaAs en fonction d'angle d'incidence pour différentes orientations cristallographiques.

Le tableau (III.1) regroupe les valeurs des angles critiques du GaAs définie par la loi de « Snell-Descartes » pour chaque direction [100], [110] et [111]. Il est clair que le changement de la direction cristallographique entraîne un changement des angles critiques des modes longitudinal,  $\theta_L$ , transversal,  $\theta_T$ , et celui de Rayleigh,  $\theta_R$ . Cependant, quelle que soit la direction considérée l'inégalité  $\theta_L < \theta_T < \theta_R$  reste toujours vérifiée.

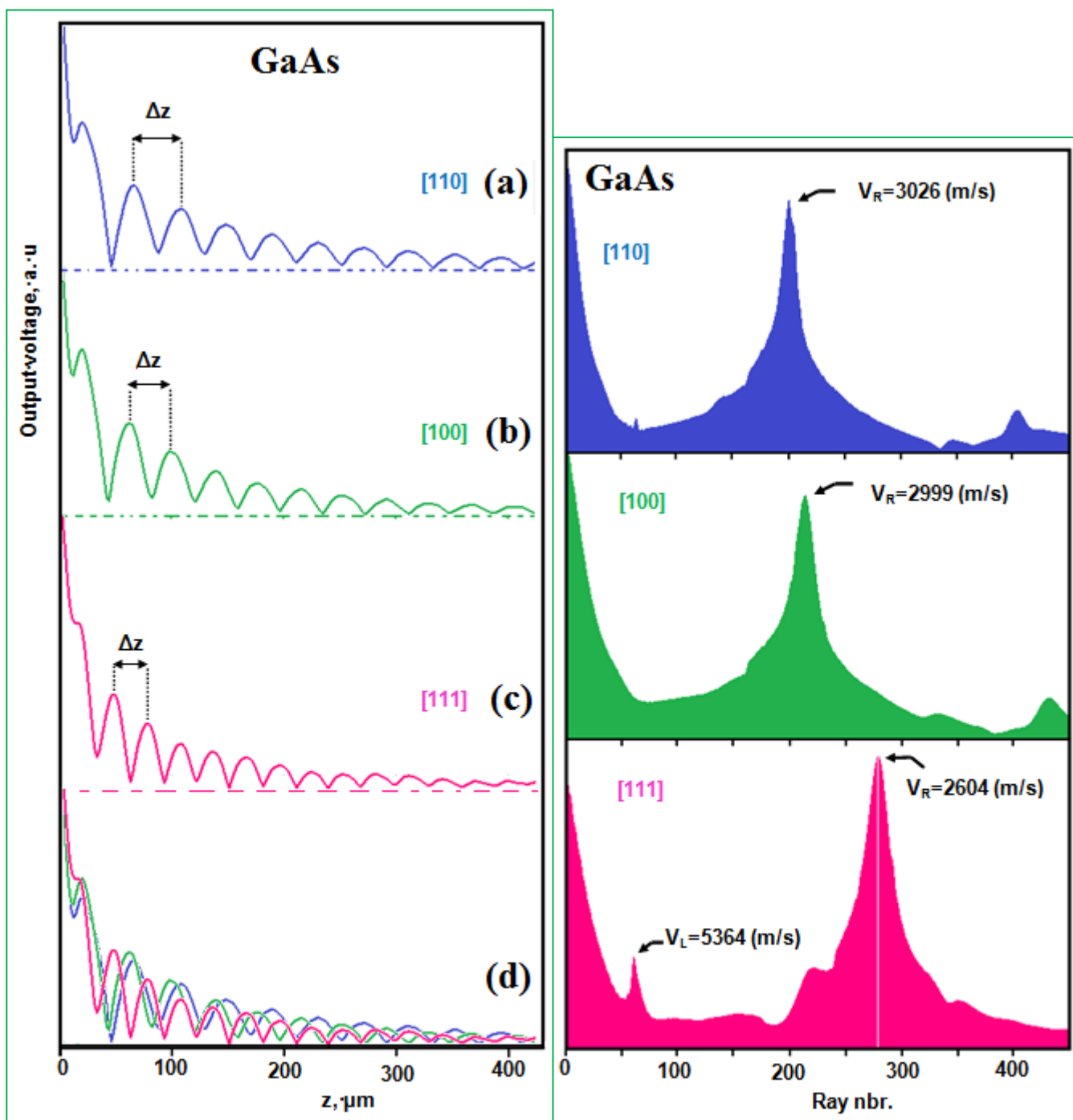
Directions cristallographiques	Angles Critiques du GaAs (°)		
	$\theta_L$	$\theta_T$	$\theta_R$
[110]	16,63	26,68	29,9
[100]	18,48	26,68	31,00
[111]	16,12	32,52	35,4

**Tableau III.1** Angles Critiques du GaAs pour différentes directions cristallographiques.

### III.3.2 Signatures Acoustiques et Leurs Spectres FFT

Les signatures acoustiques,  $V(z)$ , du matériau binaire GaAs sont calculées à partir du coefficient de réflexion et pour les trois directions cristallographiques [100], [110], et [111]. La figure III.2 illustre les résultats obtenus. On note une série d'oscillations périodiques dues aux interférences constructives et destructives des différents modes de propagation [21-22, 25]. Aussi, on peut distinguer l'effet de l'anisotropie qui influence fortement les  $V(z)$ . La figure III.2.d montre clairement la disparité entre les différentes périodes spatiales,  $\Delta z$ , conduisant à une différence entre les vitesses acoustiques du GaAs selon les trois directions. Notons que cette différence de propriétés, apparait déjà sur les courbes du coefficient de réflexion sous la forme d'un glissement des angles critiques des modes acoustiques longitudinales et de Rayleigh vers les petites valeurs pour la direction [110] et [100].

Le traitement des signatures acoustiques  $V(z)$  du GaAs (figure III.2), par la transformée de Fourier rapide, FFT, a permis d'obtenir une distribution spectrale. Notons que, chaque mode détecté dans la structure eau/substrat apparait sous forme d'un pic dans le FFT. La figure III.3 illustre les spectres FFT du GaAs pour différentes orientations cristallographiques [100], [110], et [111]. Toute variation dans les  $V(z)$  du GaAs entraîne des variations dans les spectres de FFT à partir desquels on constate que:



**Figure III.2** Effet de l'anisotropie sur les signatures acoustiques du GaAs suivant les directions cristallographiques [100], [110] et [111].

**Figure III.3** Spectres FFT à différentes directions [111], [100], et [110] du binaire GaAs.

- Dans les trois directions [100], [110] et [111], on observe l'existence d'un pic principal qui représentant le mode le plus dominant qui est celui de Rayleigh.
- Le décalage des raies principales dans les spectres de FFT entraîne une variation de la vitesse  $V_R$ .
- A partir de la relation (II.21), nous avons déterminé les vitesses de Rayleigh ; leur valeur augmente de 2600 m/s pour la direction [111] à 3026 m/s pour la direction [110].
- L'absence de la détection du mode longitudinal dans les directions [100] et [110].
- Le mode longitudinale apparait uniquement pour la direction [111]. À partir de ce pic nous avons déterminé la période spatiale,  $\Delta z$  et par conséquent la vitesse de propagation, le résultat obtenu est en bon accord avec celui calculé à partir de la littérature [20].

## III.4 Influence de l'Anisotropie sur les Propriétés de l'AlAs

### III.4.1 Effet de l'Anisotropie sur $R(\theta)$

Nous avons étudié les coefficients de réflexions de l'AlAs selon les différentes orientations [100], [110] et [111] afin de mettre en évidence leur influence sur  $R(\theta)$ . Les résultats obtenus sont représentés par la figure III.4 en fonction de l'angle d'incidence  $\theta_i$ . Pour plus de clarté, nous avons séparé l'amplitude de la phase. On note qu'il existe un changement aussi bien dans l'amplitude que dans la phase au niveau des angles critiques longitudinal, transversal et celui de Rayleigh. Cependant, à comparer au GaAs, les angles critiques sont décalés vers les petites valeurs.

Ainsi, l'anisotropie influence les coefficients de réflexion  $R(\theta)$  de l'AlAs. Notamment, le mode longitudinal et celui de Rayleigh qui sont excités tout d'abord pour la direction [110], suivie par la direction [100] et enfin la dernière [111]. Le tableau (III.2) regroupe les valeurs des angles critiques de l'AlAs déterminés par la loi de « Snell-Descartes » pour chacune des directions. Il est clair que le changement de la direction cristallographique entraîne un changement des angles critiques des différents avec l'inégalité  $\theta_L < \theta_T < \theta_R$  valable quelle que soit la direction considérée.

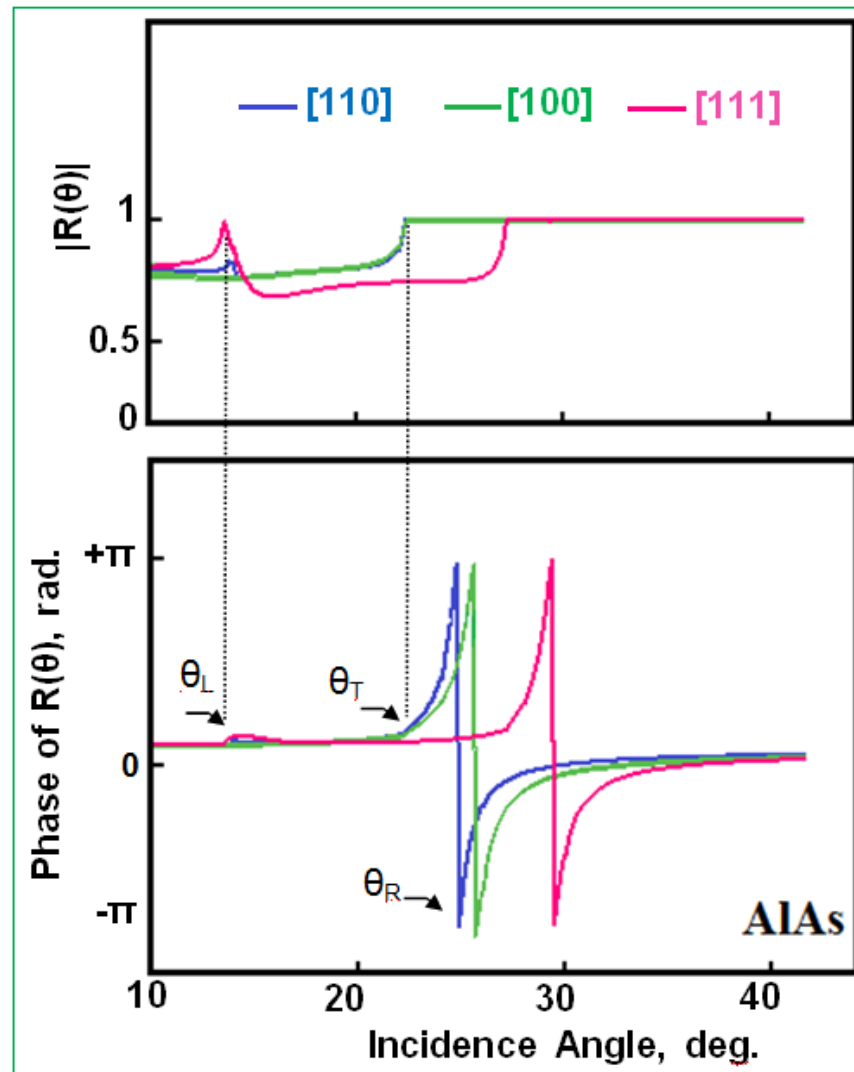


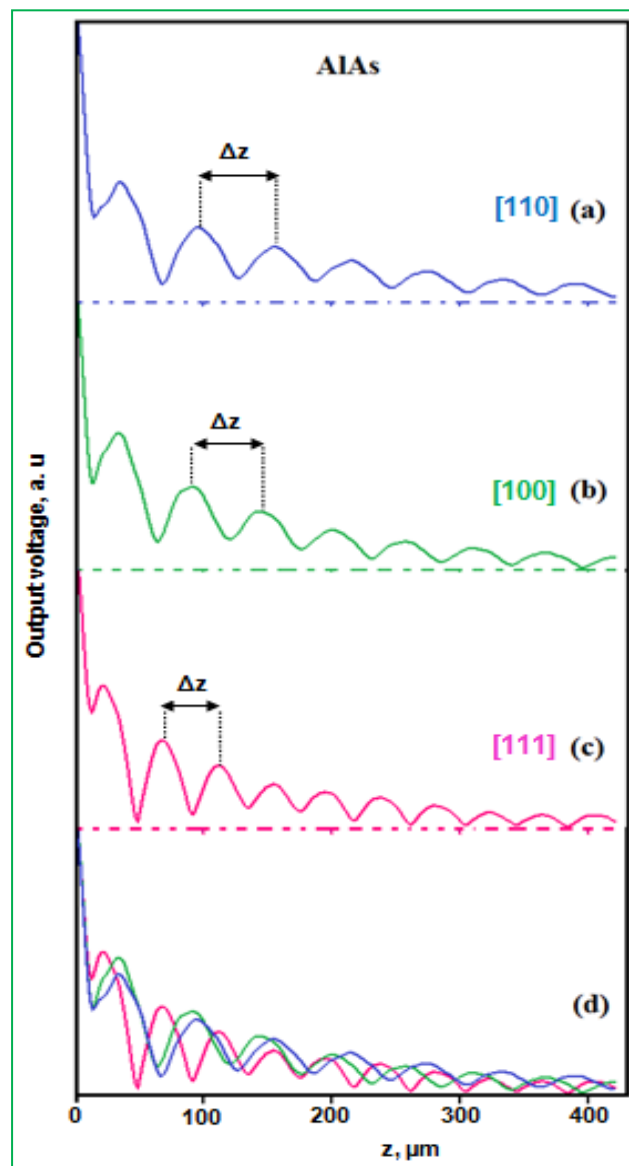
Figure III.4 Amplitudes et phases des coefficients de réflexion pour l'AlAs en fonction de l'angle d'incidence pour différentes orientations.

Directions cristallographiques	Angles Critiques du AlAs		
	$\theta_L$	$\theta_T$	$\theta_R$
[110]	13,86	22,25	24,8
[100]	15,39	22,25	25,6
[111]	13,44	27,12	29,4

Tableau III.2 Angles Critiques du AlAs pour différentes directions cristallographiques.

### III.4.2 Effet de l'Anisotropie sur les $V(z)$

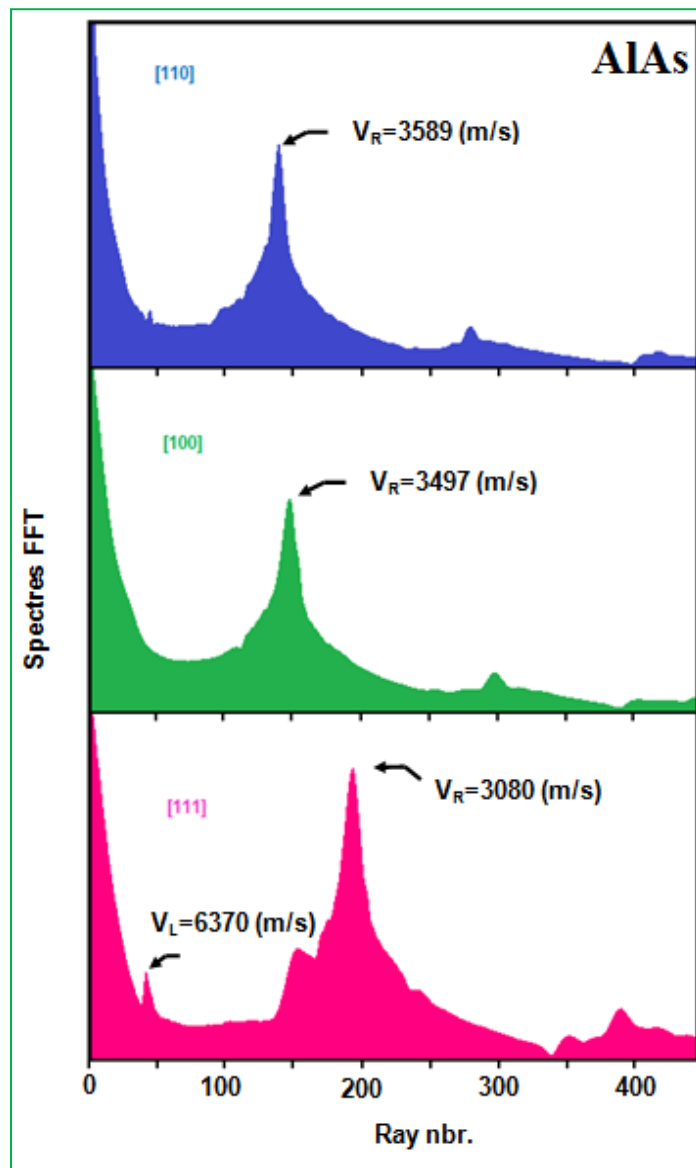
Les  $V(z)$  calculées à  $f = 140$  MHz et  $\theta_{\text{lens}} = 50^\circ$  pour la structure eau/AlAs à différentes directions cristallographiques [100], [110] et [111] sont représentés sur la figure III.5. Des observations similaires aux  $V(z)$  du GaAs peuvent être formulées. On note des oscillations des  $V(z)$  caractérisées par une période spatiale et une amplitude dont les valeurs sont caractéristiques de chaque orientation cristallographique. Pour une meilleure comparaison, nous représentons sur la figure III.5.d, l'évolution des  $V(z)$  pour les trois directions. On constate que la réponse dans la direction [110] est plus rapide à comparer aux deux autres directions.



**Figure III.5** Variation des signatures acoustiques de l'AlAs en fonction de la direction cristallographique [100], [110], et [111].

### III.4.3 Effet de l'Anisotropie sur les Spectres FFT

La figure III.6 montre les spectres de FFT des courbes de  $V(z)$  de la figure III.5 pour le binaire AlAs. Ces spectres illustrent l'effet de l'anisotropie sur les signatures acoustiques de AlAs. Notamment, quand on change de direction cristallographique, on observe un décalage des pics principaux des modes de propagations. A partir de la raie principale de chaque mode détecté, nous calculons la vitesse de propagation correspondante. Ainsi, nous avons obtenu  $V_R = 3080, 3497$  m/s et  $3589$  m/s respectivement pour les directions [111], [100] et [110]. Quant au mode longitudinale qui apparait seulement dans la direction [111], il se propage avec une vitesse,  $V_L = 6370$  m/s.



**Figure III.6** Spectres FFT du binaire AlAs à différentes directions cristallographiques [111], [100] et [110].

## III.5 Généralisation au Composé $Al_xGa_{1-x}As$

### III. 5.1 Effet de l'Anisotropie sur le Coefficient de Réflexion

Après l'étude des éléments binaires constitutifs du composé ternaire, nous nous intéressons dans cette section à l'influence de l'anisotropie sur les propriétés élastiques du composé  $Al_xGa_{1-x}As$  pour différents fraction d'Al ( $x = 0,2; 0,4; 0,6; \text{ et } 0,8$ ) dans les mêmes conditions des simulations indiqué au chapitre II. Pour chaque direction cristallographique [111], [100], et [110], nous avons tout d'abord calculé le coefficient de réflexion. Les résultats sont présentés par la figure III.7 en termes de  $R(\theta)$  en fonction de l'angle d'incidence,  $\theta_i$ .

L'allure générale de toutes les courbes est identique aux résultats précédents: des fluctuations pour l'amplitude ainsi que pour la phase aux angles critiques  $\theta_L$ ,  $\theta_T$ , et  $\theta_R$  qui se terminent par une saturation finale avec  $|R(\theta)| = 1$ . Par ailleurs, on note l'influence de deux paramètres : Le premier correspond à l'influence de l'augmentation de la fraction d'Al,  $x$ , pour une même direction. Il est clair que les angles critiques  $\theta_L$ ,  $\theta_T$ , et  $\theta_R$  deviennent plus petits lorsque la fraction d'Al augmente. Quant au second, il concerne l'anisotropie, le coefficient de réflexion, pour une fraction d'Al choisie, dépend de la direction cristallographique considérée. Notamment, on peut constater :

- Les angles critiques des modes longitudinal,  $\theta_L$ , transversal,  $\theta_T$ , et celui de Rayleigh,  $\theta_R$  sont différents d'une direction à une autre mais  $\theta_L < \theta_T < \theta_R$  reste toujours valable.
- Les angles critiques apparaissent tout d'abord dans la direction [110], puis dans la direction [100], enfin la direction [111].
- L'angle critique du mode de Rayleigh  $\theta_R$ , prend des valeurs maximales dans la direction [111].
- Pour chaque fraction d'Al considéré, les coefficients de réflexion dans les directions [110] et [100] sont plus proches à comparer à [111].

### III.5.2 Effet de l'Anisotropie sur les Signatures Acoustiques $V(z)$

La signature acoustique,  $V(z)$ , représente le signal de sortie en fonction de la distance,  $z$ , de défocalisation. La variation de phase et d'amplitude du coefficient  $R(\theta)$  permet de calculer les différentes signatures acoustiques pour les différentes directions



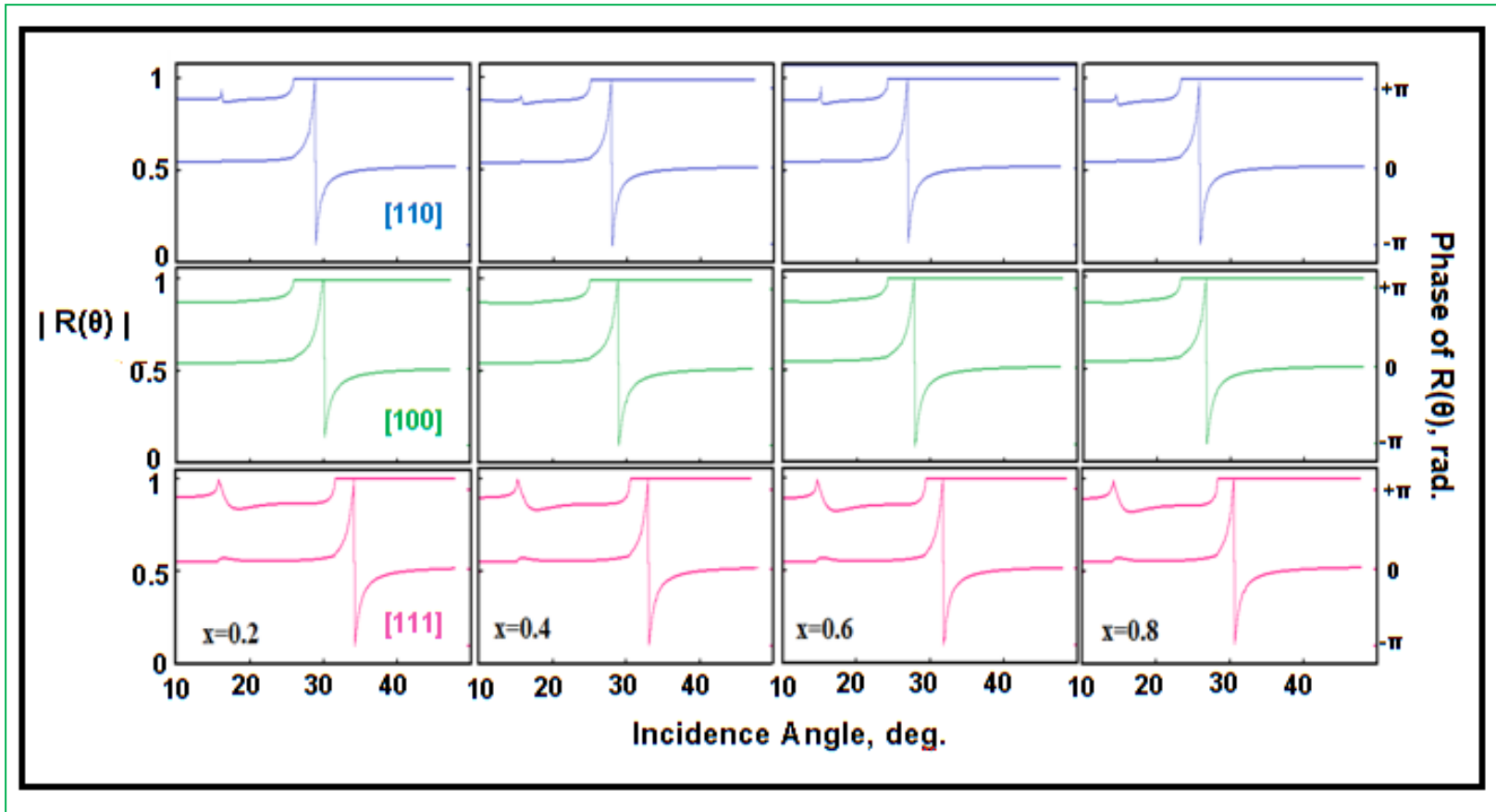


Figure III.7 Coefficient de réflexions obtenues à différents directions cristallographiques pour certaine fraction d'Al de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ .

cristallographiques. La figure III.8 illustre les signatures acoustiques pour les trois directions cristallographiques [111], [100], et [110] de certaines fractions d'Al ( $x = 0,2; 0,4; 0,6; \text{ et } 0,8$ ) de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ . Il est clair que toutes les courbes de  $V(z)$  présentent une valeur maximale au point focal ( $z = 0 \mu\text{m}$ ) suivie d'un comportement oscillatoire dû aux interférences constructives et destructives des modes de propagation caractéristiques avec des périodes spatiales  $\Delta z$  [21].

Cependant, ces signatures acoustiques varient d'une direction à une autre. Nous constatons qu'il existe une différence entre ces  $V(z)$  aussi bien en amplitude qu'en période.

- En amplitude, la courbe s'atténue rapidement pour la direction [110] ensuite pour la direction [100], enfin pour [111].
- En période, nous observons que le changement de la direction cristallographique change la période spatiale,  $\Delta z$ , pour chaque fraction d'Al,  $\Delta z$  atteint le max dans la direction [110], puis [100], enfin pour la direction [111].
- De plus, pour une même direction, aussi bien le module que la période des  $V(z)$  sont fortement influencés par la fraction d'Al de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ . Ainsi, quand  $x$  varie de 0,2 à 0,8; aussi bien l'amplitude que la période  $\Delta z$  augmentent.

D'après ces résultats, on remarque clairement que l'anisotropie influence fortement les  $V(z)$ . Pour plus d'informations, un traitement de ces signatures par transformée de Fourier rapide FFT est nécessaire.

### III.5.3 Effet de l'Anisotropie sur les Spectres FFT

La signature acoustique est formée de signaux périodiques. Pour déterminer leurs périodes spatiales  $\Delta z$ , il est nécessaire de faire un traitement de signal par transformée de Fourier FFT. Ce traitement permet de distinguer les différents pics du spectre discret de  $V(z)$  et qui correspondent aux différents modes de propagation de l'onde acoustique. C'est ainsi qu'on peut déterminer les vitesses de propagation de surface et de volume. La figure III.9 montre les spectres FFT d' $Al_xGa_{1-x}As$  en fonction de changement d'orientations cristallographiques pour quelques fractions d'Al ( $x = 0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; \text{ et } 0,8$ ). Selon la direction [111], on remarque deux pics correspondant à deux modes de propagation qui sont successivement le mode longitudinal et celui de Rayleigh. Par ailleurs, pour les

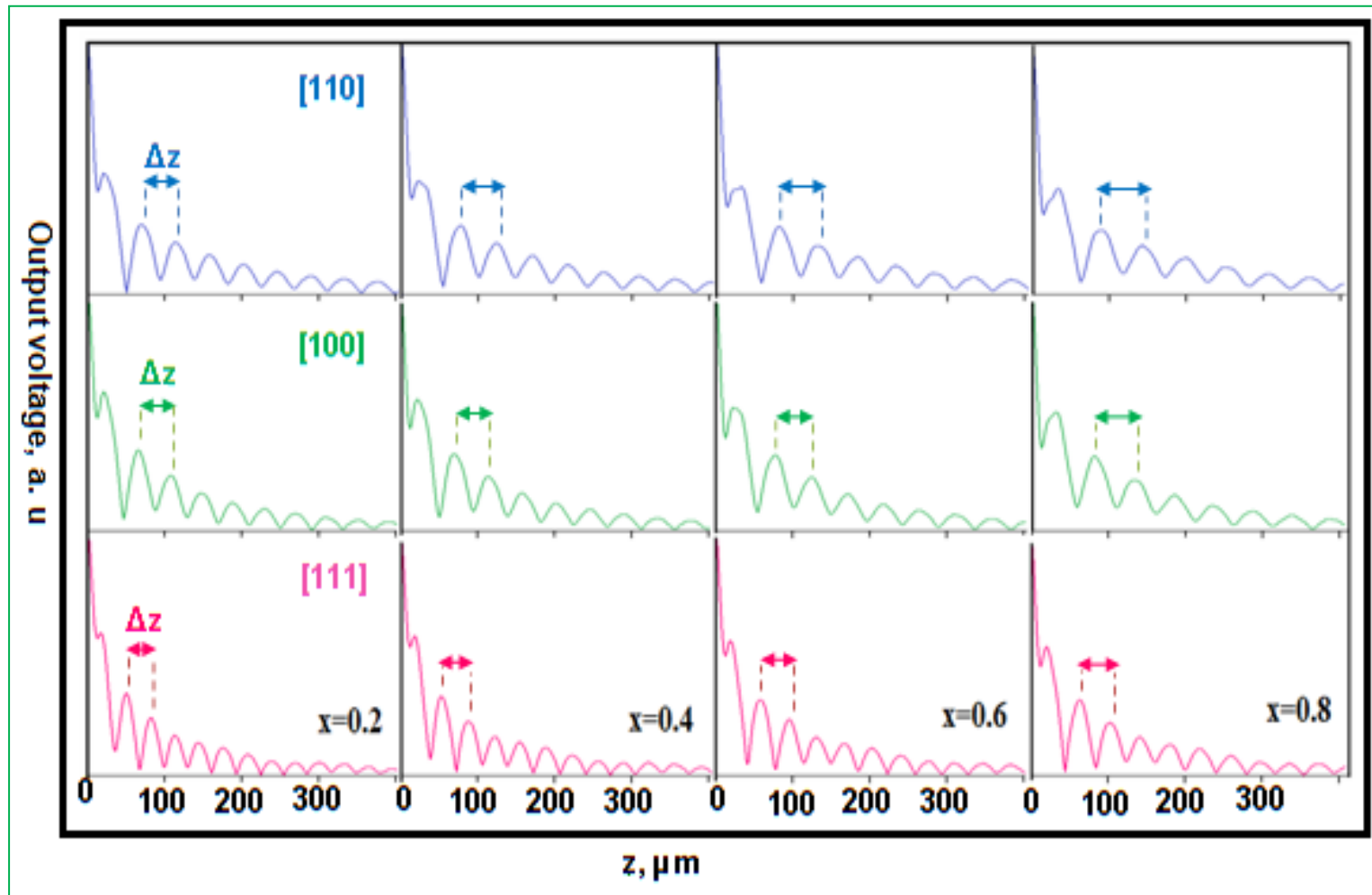


Figure III.8 Signatures acoustiques obtenues à différents directions cristallographiques pour certaine fraction d'Al de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ .

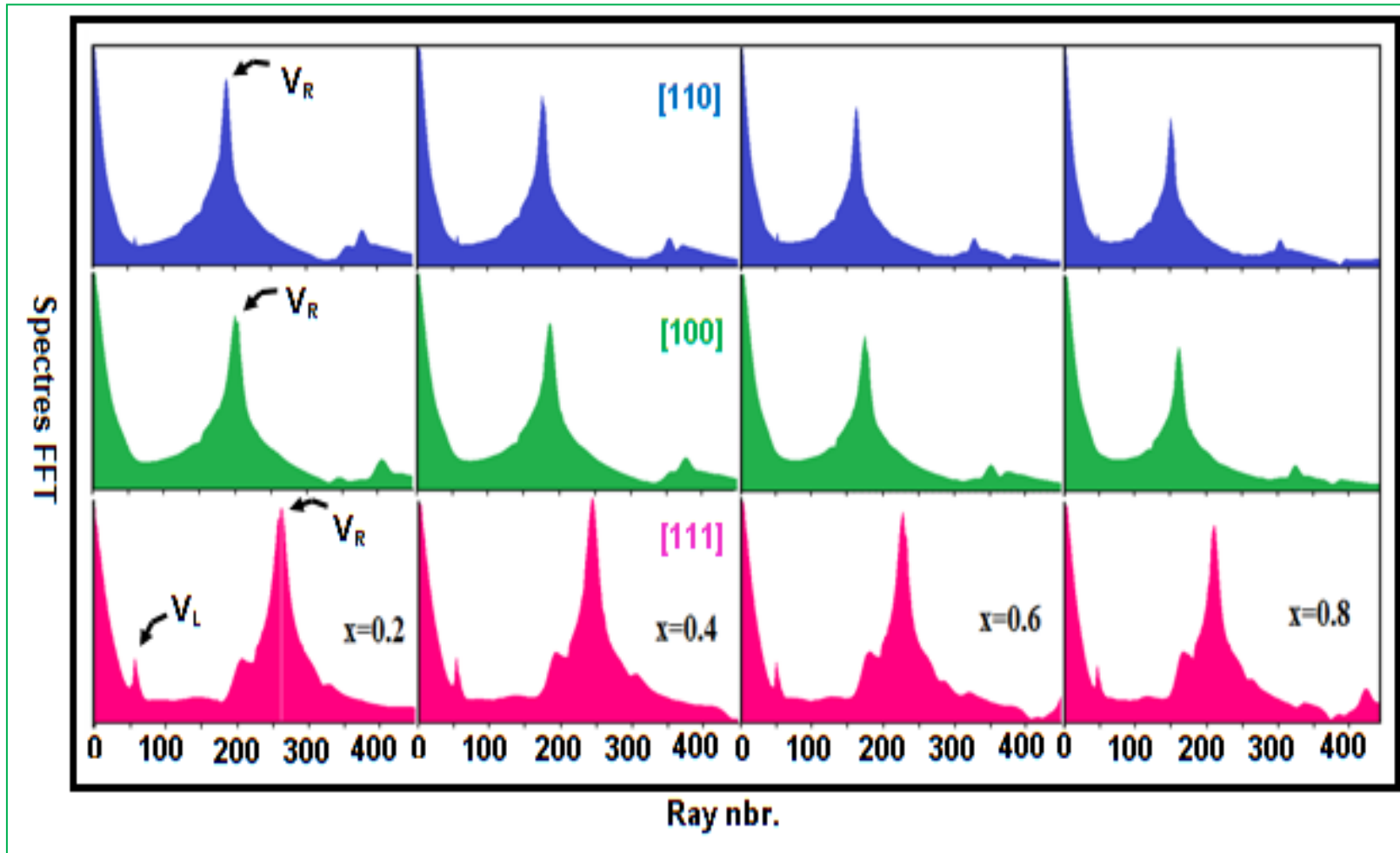


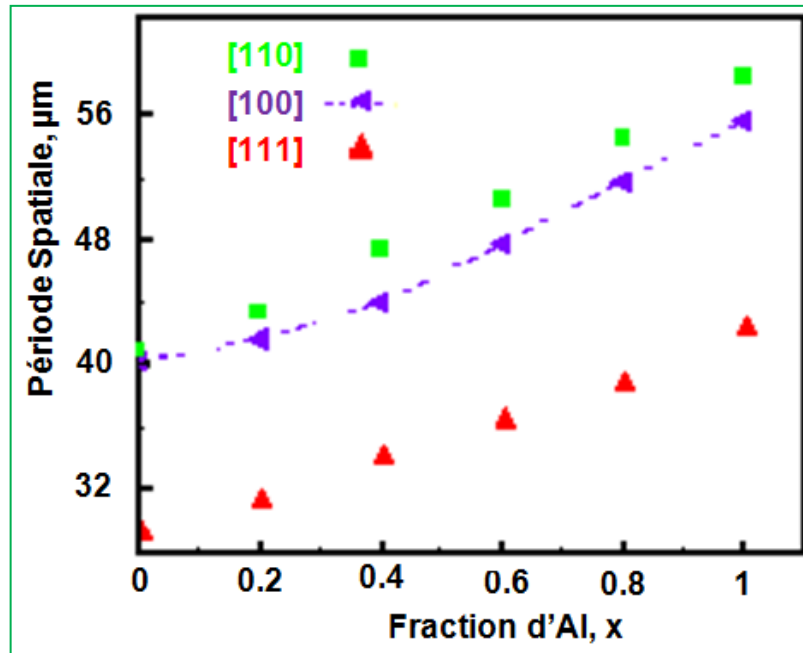
Figure III.9 Spectre de FFT obtenu à partir de la courbe  $V(z)$  de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$  à différent directions.

directions [100] et [110], un seul pic est noté, il correspond au mode de Rayleigh. Ainsi, si l'on prend le spectre avec  $x = 0,2$  comme référence et on se déplace de la direction [111] vers [100] puis [110], on voit bien un décalage des raies principales dans les spectres de FFT. Cependant, pour une même direction choisie, lorsque la fraction d'aluminium augmente de 0,2 à 0,8 ; les pics relatifs au mode de Rayleigh qui est le plus dominant changent de position.

## III.6 Analyse et Quantifications de l'Effet de l'Anisotropie

### III.6.1 Période Spatiale

L'analyse des signaux  $V(z)$  par FFT (figure III.9) de la structure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  selon les trois orientations [111], [100], et [110] a permis de déterminer les périodes spatiales,  $\Delta z$ , séparant deux maxima ou deux minima successifs. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure III.10. Il est clair que, les périodes spatiales  $\Delta z$  varient d'une direction cristallographique à une autre. Cependant, les  $\Delta z$  augmentent au fur et à mesure que la fraction d'Al augmente, quelle que soit la direction considérée. Notons que, la valeur la plus importante de  $\Delta z$  correspond à la direction [110] qui est la plus dense. A comparer à la direction [111], la différence entre les directions [100] et [110], n'est pas très significatif.



**Figure III.10** Périodes Spatiales  $\Delta z$  en fonction de la fraction d'Al dans les directions [111], [100], et [110] de la structure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .

Pour enrichir nos investigations des effets de l'anisotropie sur les propriétés acoustiques de la structure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  pour  $0 \leq x \leq 1$ , nous avons quantifié l'évolution de la période spatiale  $\Delta z$  en fonction de la fraction d'Al sur toute la gamme de  $x$  selon les trois directions cristallographiques [111], [100] et [110]. Ainsi, en utilisant une méthode d'optimisation, nous avons déduit que la variation de la période avec la fraction d'Al suit une allure non linéaire (quelle que soit la direction cristallographique), de la forme :

$$\Delta z (\mu\text{m}) = A x^2 + B x + C \quad (\text{III.3})$$

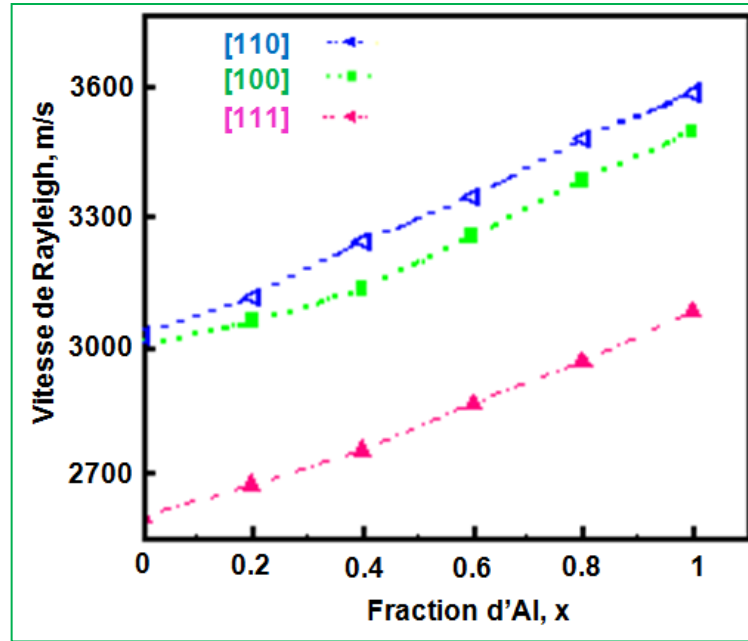
Où A, B et C sont des constantes caractéristiques de chaque direction et dont les valeurs sont regroupées dans le tableau (III.3) :

$\Delta z (\mu\text{m})$	[111]	[100]	[110]
<b>A</b>	2,67	7,95	2,72
<b>B</b>	10,19	7,99	15,16
<b>C</b>	29,27	39,72	40,65

**Tableau III.3** Valeurs des constantes polynomiales de la période spatiale.

### III.6.2 Vitesse de Rayleigh

Les résultats des périodes des oscillations, obtenues par traitement numérique FFT des signatures  $V(z)$  de la structure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , permettent de déterminer les vitesses  $V_R$  de Rayleigh que l'on étudiera en fonction de la fraction d'Al  $x$  dans la gamme 0 - 1 et pour les trois directions cristallographiques [111], [100] et [110]. Pour bien illustrés l'influence de l'anisotropie sur  $V_R$ , nous présentons les vitesses obtenues dans la figure III.11. On note l'augmentation des valeurs de  $V_R$  au fur et à mesure que la fraction d'Al augmente quelle que soit la direction considérée. Ceci est en bon accord avec les prédictions théoriques prévues par « *Vicktorov* » [26]. Aussi, pour  $x < 0,2$  la variation normalisée des vitesses est presque la même pour les directions [100] et [110]. Par ailleurs, pour toutes les valeurs de  $x$  de l'intervalle [0,1], la vitesse de Rayleigh pour les deux directions [100] et [110] est plus efficace à comparer à la direction [111]. D'ailleurs, la valeur la plus importante



**Figure III.11** Évolution de la vitesse de Rayleigh  $V_R$  en fonction de la fraction d'Al selon les trois directions cristallographiques [111], [100] et [110].

correspond à la direction [110] qui est la plus dense. En effet, la croissance de la fraction d'Al conduit à la diminution de la distance interatomique de la structure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Par conséquent, la propagation des ondes de surface est plus facile en rapprochant les atomes menant à une augmentation de  $V_R$ . Notons que les valeurs minimales et maximales de  $V_R$  correspondantes respectivement à celle des matériaux anisotropes GaAs, et AlAs. Enfin, l'optimisation des courbes, conduit déduit à une évolution non linéaire de la forme :

$$V_R = A'x^2 + B'x + C' \quad (\text{III.4})$$

Où  $A'$ ,  $B'$  et  $C'$  sont des constantes caractéristiques de chaque direction et dont les valeurs sont regroupées dans le tableau III.4. Ces résultats sont comparables avec ceux de la référence « *Vicktorov* », avec un bon accord. Enfin, nous pouvons conclure que quels que soient  $x$  et la direction considérée, l'évolution suit une allure semblable dont les polynômes caractéristiques ont été quantifiés.

$V_R$ (m/s)	[111]	[100]	[110]
<b>A'</b>	121,43	224,55	42,41
<b>B'</b>	365,57	289,16	531,58
<b>C'</b>	2602,85	2992,75	3020,32

**Tableau III.4** Valeurs des constantes polynomiales de vitesse de Rayleigh de la structure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ .

### III.6.3 Angles Critiques

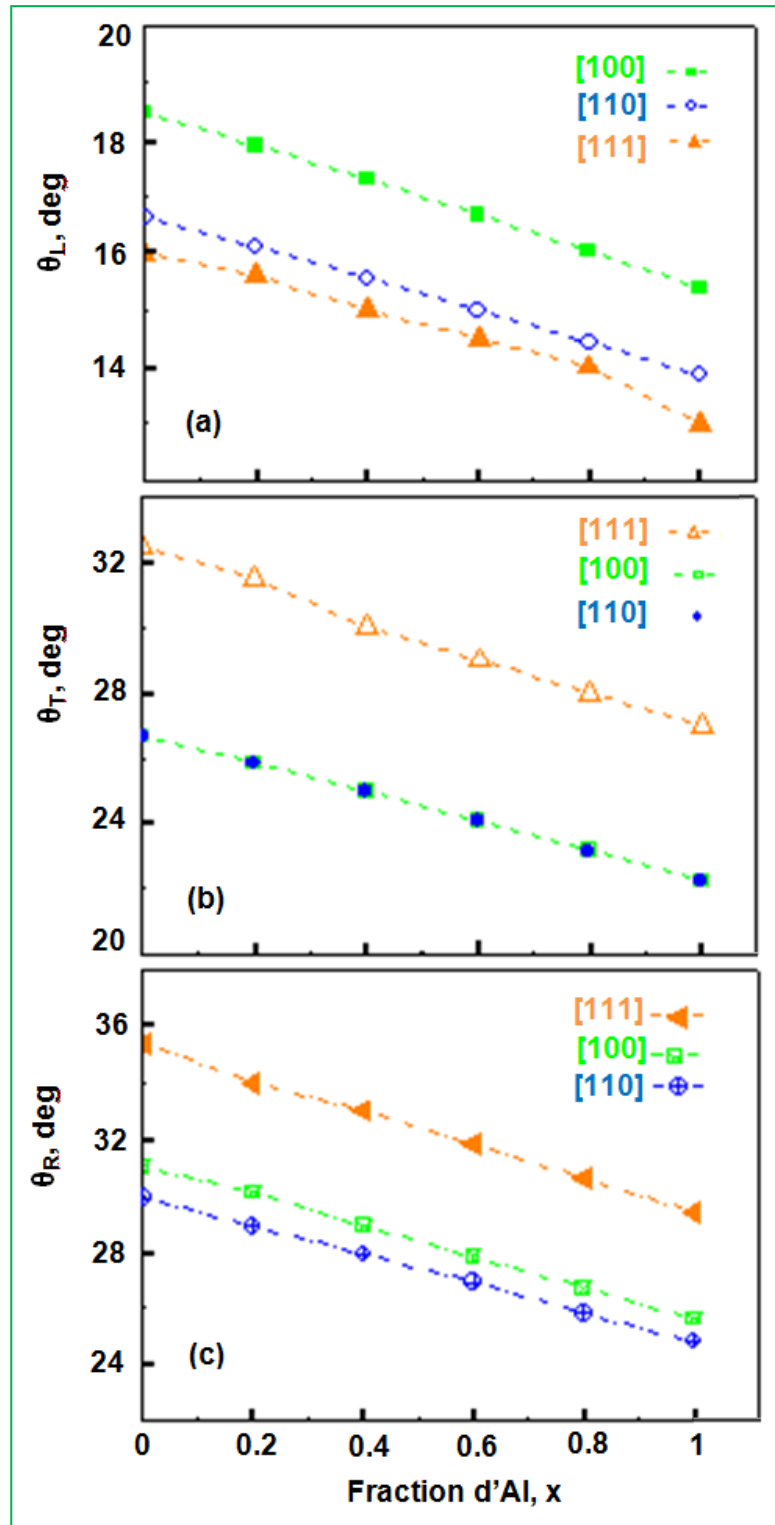
Le tableau (III.5) regroupe les valeurs des angles critiques  $\theta_L$ ,  $\theta_T$  et  $\theta_R$  de la structure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  pour les directions cristallographiques [111], [100] et [110], déterminés par les lois de « Snell-Descartes ».

Angles critiques du composé $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (deg)									
Directions	[111]			[100]			[110]		
Fraction d'Al	$\theta_L$	$\theta_T$	$\theta_R$	$\theta_L$	$\theta_T$	$\theta_R$	$\theta_L$	$\theta_T$	$\theta_R$
<b>0</b>	16	32,5	35,4	18,48	26,68	31,0	16,63	26,68	29,9
<b>0,2</b>	15,6	31,5	34	17,9	25,86	30,1	16,11	25,86	28,9
<b>0,4</b>	15	30	33	17,31	24,99	28,9	15,56	24,99	27,9
<b>0,6</b>	14,5	29	31,8	16,68	24,09	27,8	15	24,09	26,9
<b>0,8</b>	14	28	30,6	16,04	23,18	26,7	14,43	23,18	25,8
<b>1</b>	13	27	29,4	15,39	22,25	25,6	13,86	22,25	24,8

**Tableau III.5** Angles critiques pour chaque direction cristallographique d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  pour la fraction d'Al  $0 \leq x \leq 1$ .



Pour mieux voir l'influence de l'anisotropie sur les angles critiques des différents modes : transversales  $\theta_T$ , longitudinales  $\theta_L$ , et celui de Rayleigh  $\theta_R$ , nous représentons dans la figure III.12, les courbes des variations de  $\theta_C$  (C indique T, L, ou R) en fonction de la



**Figure III.12** Variation des angles critiques de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  pour les directions [111], [100], et [110].

fraction d'Al ( $0 \leq x \leq 1$ ) pour les directions [111], [100], et [110]. On observe que l'anisotropie conduit à un changement très net dans les valeurs des angles critiques dans toute la gamme d'aluminiums. Aussi, on remarque que ces angles critiques subissent une décroissance au fur à mesure que la fraction d'Al augmente. Tous les angles critiques des directions [100] et [110] sont plus rapprochés à comparer à ceux de [111]. Par ailleurs  $\theta_T$  est presque identiques pour les deux directions [100] et [110] comme illustré dans la figure III.12.b. Enfin, l'optimisation des courbes, a quantifié l'influence de l'anisotropie sur les angles critiques  $\theta_L$ ,  $\theta_T$  et  $\theta_R$  pour la fraction d'Al variable de 0 à 1 selon une variation linéaire du type :

$$\theta_C = A''x + B'' \quad (III.5)$$

où  $A''$  et  $B''$  sont des constantes caractéristiques de chaque angle critique et pour chaque directions. Le tableau III.6 regroupe les différentes relations.

Equations caractéristiques des variations des angles critiques du composé $Al_xGa_{1-x}As$ (deg)			
Directions	$\theta_L$	$\theta_T$	$\theta_R$
[111]	$16,13 - 2,9 x$	$32,45 - 5,57 x$	$35,32 - 5,91 x$
[100]	$18,51 - 3,09 x$	$26,72 - 4,41 x$	$31,08 - 5,47 x$
[110]	$16,65 - 2,77 x$	$26,72 - 4,44 x$	$29,92 - 5,11 x$

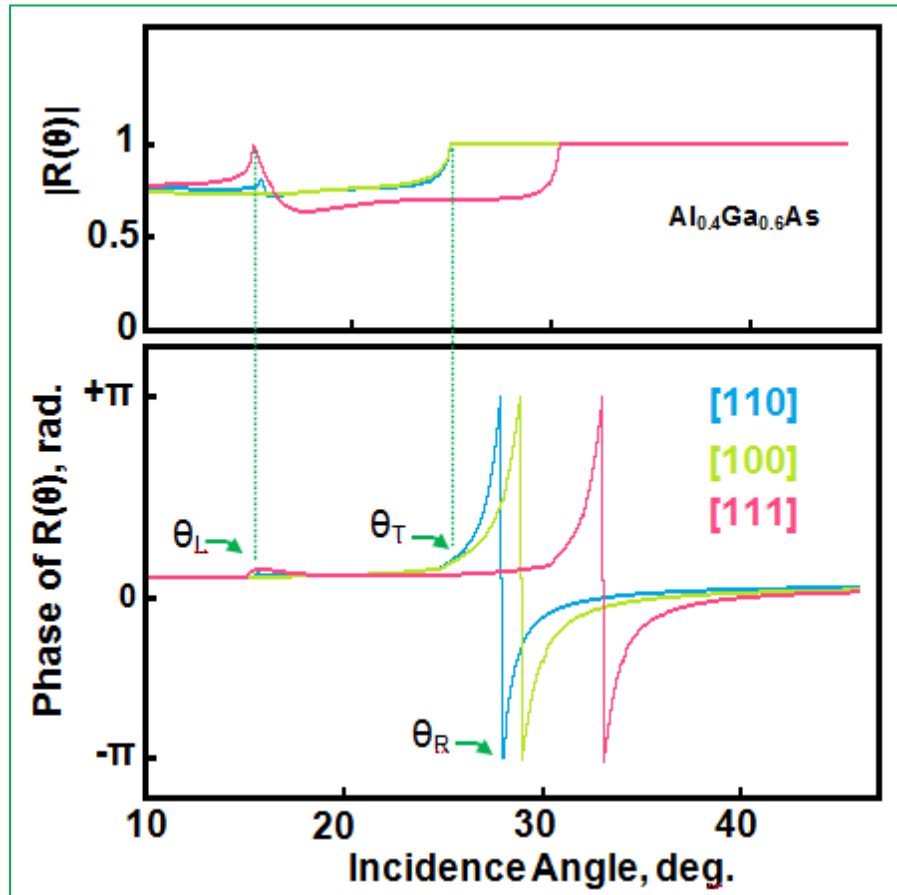
**Tableau III.6** Équations caractéristiques des variations des angles critiques de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ .

## III.7 Application au Composé $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$

### II.7.1 Coefficient de Réflexion

Les coefficients de réflexion de la structure  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ , ont été calculés pour les trois directions [100], [110], et [111]. La figure III.13 illustre les résultats obtenus de l'amplitude et de la phase en fonction de l'angle d'incidence. Il est clair qu'à mesure que l'angle d'incidence augmente, nous remarquons des changements importants d'amplitude et de phase. Notons que l'allure générale des variations de  $R(\theta)$  est fortement influencée par l'anisotropie. Le degré de fluctuations de la phase et de l'amplitude de  $R(\theta)$  montre

l'efficacité de génération des différents modes. Il est évident que le mode de Rayleigh, qui montre un déphasage de  $2\pi$ , est beaucoup plus important; par conséquent, il domine tous les autres qui pourraient être excités.



**Figure III.13** Amplitudes et phases des coefficients de réflexion de la structure  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  pour différentes orientations.

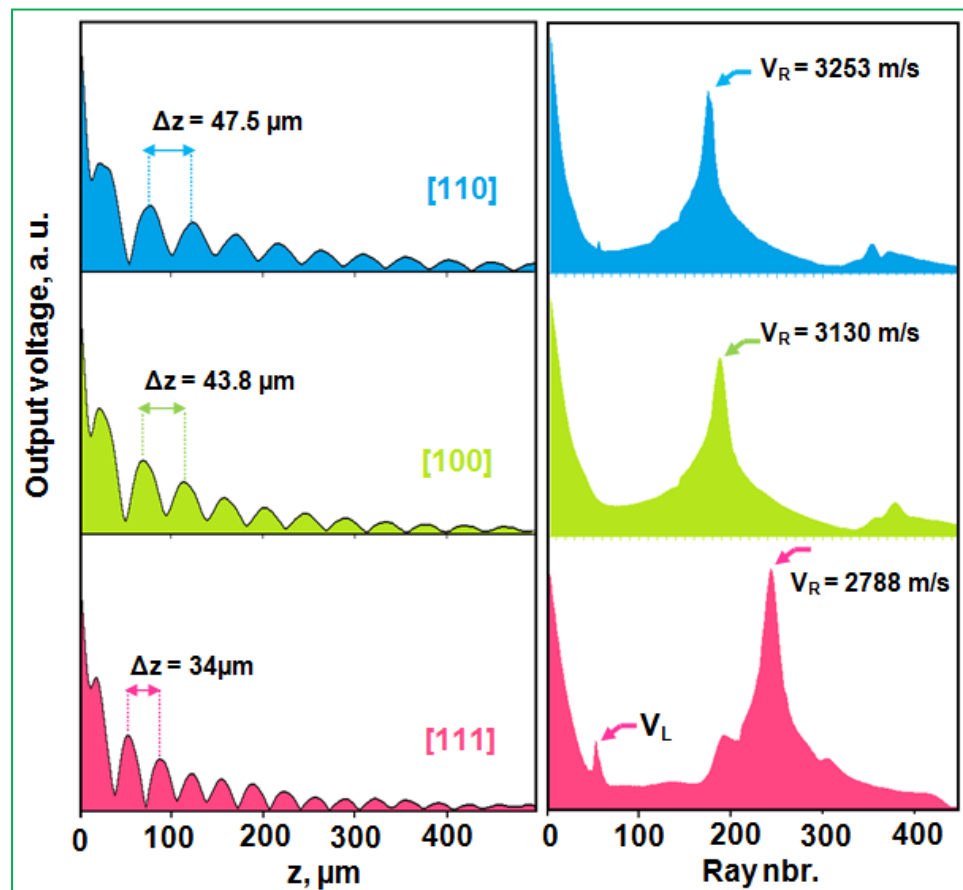
Notons qu'aussi bien le mode longitudinal que celui de Rayleigh sont excités tout d'abord pour la direction [110], suivie par la direction [100] et enfin la direction [111]. Le tableau (III.7) regroupe les valeurs des angles critiques de réflexion totale définie par les lois de « Snell-Descartes » pour chaque direction. Il est clair que le changement de la direction cristallographique entraîne un changement des angles critiques des modes longitudinal,  $\theta_L$ , transversal,  $\theta_T$ , et celui de Rayleigh,  $\theta_R$ ; avec,  $\theta_L < \theta_T < \theta_R$  quelle que soit la direction considérée. Ce résultat est bien conforme aux données de la littérature qui stipulent que la génération des Skimming apparaît au centre de la lentille autrement dit aux faibles angles d'ouverture.

Directions cristallographiques	Angles Critiques de la structure $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ (deg)		
	$\theta_L$	$\theta_T$	$\theta_R$
[110]	15,56	25	27,9
[100]	17,31	25	28,9
[111]	15	30	33

**Tableaux III.7** Angles critiques des modes longitudinal, transversal et de Rayleigh de la structure  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ .

### II.7.2 Signatures Acoustiques et Spectres FFT

La figure III.14 illustre les signatures acoustiques  $V(z)$  et leurs spectres de FFT du composé  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  pour les trois directions cristallographiques [100], [110] et [111]. On



**Figure III.14** Signatures acoustiques du composé  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  pour les différentes directions [100], [110] et [111].

constate que ces courbes sont caractérisées par une série d'oscillations périodiques dues aux interférences constructives et destructives des différents modes excités. Les trois signatures ont pratiquement la même variation avec une légère atténuation du signal  $V(z)$  pour  $z > 400 \mu\text{m}$ . Par contre, on note une nette différence dans les valeurs de la période spatiale,  $\Delta Z$ . Cette valeur augmente de  $34 \mu\text{m}$  obtenue pour la direction  $[111]$  à  $47,5 \mu\text{m}$  pour  $[110]$ . Ce résultat mène à une augmentation de la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh de  $2788 \text{ m/s}$  à  $3253 \text{ m/s}$  conduisant ainsi à une variation de  $16 \%$ .

Notons que, la génération la plus efficace du mode de Rayleigh est obtenue pour la direction  $[110]$ . De même pour l'amplitude du  $V(z)$ , la courbe s'atténue rapidement pour la direction  $[110]$  ensuite pour  $[100]$  et enfin pour  $[111]$ . Cela confirme que les courbes  $V(z)$  sont directement liée au coefficient de réflexion de l'échantillon par une intégrale de type Fourier. Quant au mode longitudinale, les courbes de FFT montrent qu'il ne peut être détecté d'une façon significative que pour la direction  $[111]$ .

Pour une meilleure comparaison, la figure III.15 illustre la différence entre les  $V(z)$  et leurs spectres FFT d' $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  selon les trois directions cristallographiques  $[100]$ ,  $[110]$ , et  $[111]$ . L'effet de l'anisotropie est bien remarquable : la réponse dans la direction  $[110]$  est plus rapide à comparer aux deux autres directions.

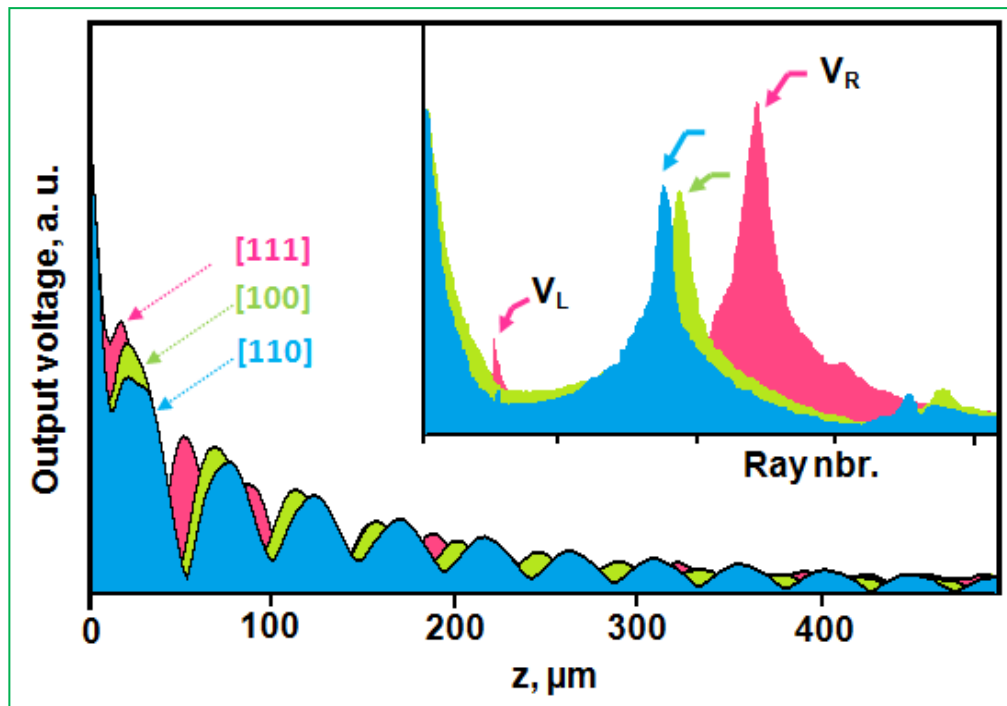


Figure III.15 Superpositions des  $V(z)$  et leurs spectres FFT du composé  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  pour les différentes directions.

Notons que cette différence de propriétés, apparaît déjà sur les courbes de  $R(\theta)$  du composé  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  (figure III.13) dont les angles critiques des modes longitudinales et de Rayleigh sont décalés vers les petites valeurs d'angle d'incidence pour les directions [100] et [110].

## III.8 Étude du Phénomène de Dispersion

### III.8.1 Procédure de Calcul

L'analyse de la dispersion de la vitesse de propagation des ondes de surface permet de différencier les propriétés d'une couche mince de celles du substrat sur lequel elle est déposée. En effet, cette procédure met en évidence l'évolution des propriétés élastiques en fonction de l'épaisseur de la couche,  $d$ , normalisée à la longueur d'onde transversale,  $\lambda_T$ . Le résultat est regroupé en deux types de dispersion :

- **Une dispersion positive** : Le comportement dispersif suit globalement une allure similaire pour toutes les structures : une augmentation initiale dans la première zone, suivie par une région de saturation.
- **Une dispersion négative** : Le comportement dispersif suit une évolution inverse à comparer au positif : une diminution initiale dans la première zone, suivie par une région de saturation.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la structure  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$  et pour différentes orientations cristallographiques. Comme, nous avons considéré la vitesse de l'onde de Rayleigh car, elle est la plus détecté et la plus dominante. L'étude quantitative a été réalisée dans le cas d'une simulation théorique par le microscope acoustique en mode de réflexion avec une fréquence de travail de 140 MHz et  $\theta_{\text{lens}} = 50^\circ$ .

La procédure de calcul est répétée pour plusieurs épaisseurs,  $d$ , de la couche allant de zéro à  $2\lambda_T$ . Cette investigation nous a permis d'établir les courbes de dispersion de la vitesse de Rayleigh dans la structure  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$ . Notons que cette structure étudiée aussi bien la couche que le substrat sont anisotropiques. Donc, l'analyse se réalisée pour chaque direction de la couche et chaque direction du substrat.

### III.8.2 Dispersion de $V_R$ dans la Structure $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$

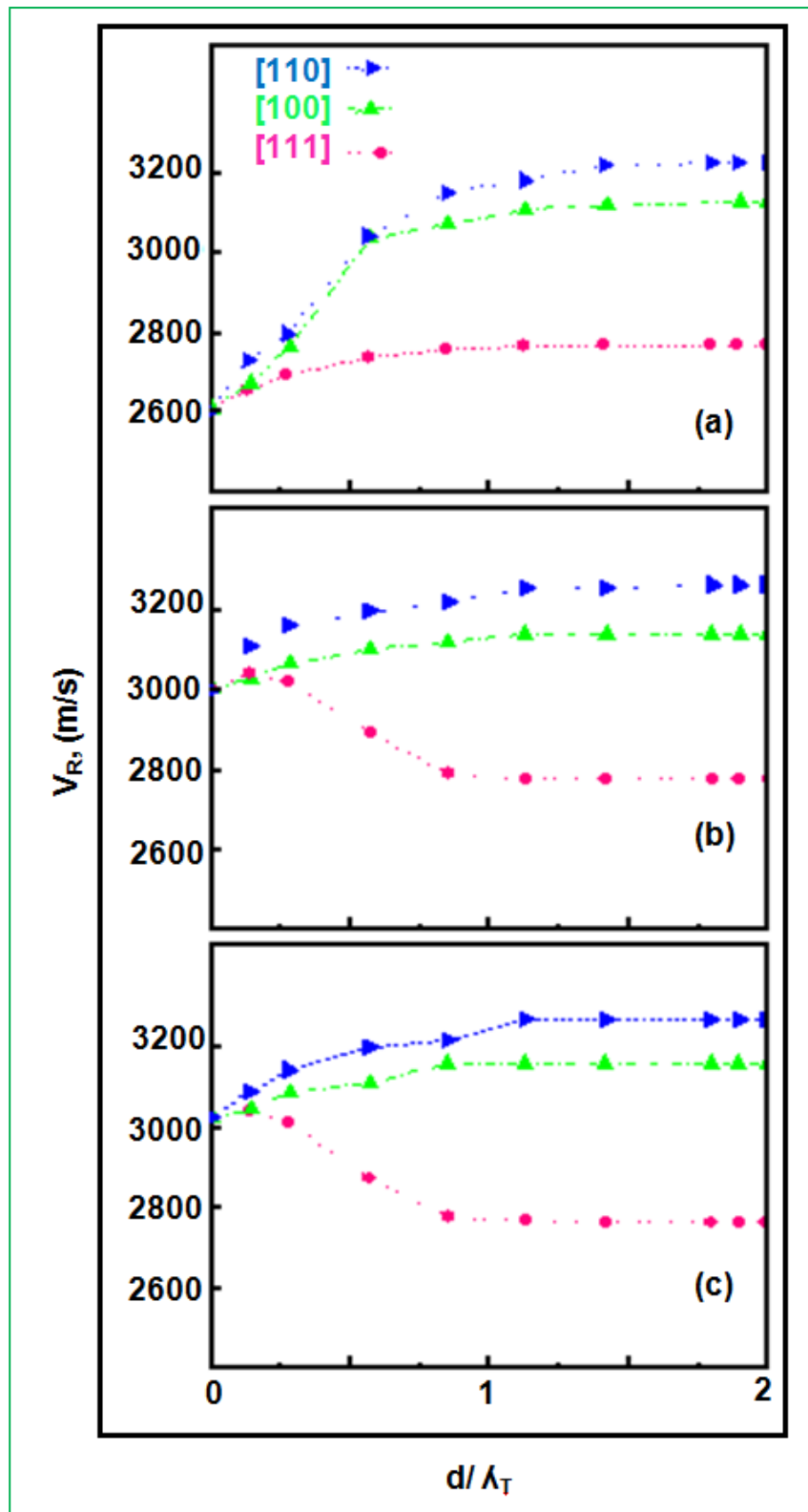
L'étude a été menée pour les trois variante de structures :  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}_{[111]}$ , puis  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}_{[100]}$  et  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}_{[110]}$ . Pour chaque combinaison et pour chaque direction cristallographique de la couche  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ , nous répétons la procédure de calcul mentionnée ci-dessus. Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure III.16 pour les trois directions de la couche et pour chaque orientation du GaAs. Il est remarquable que l'anisotropie influence le comportement dispersif des différentes structures. Ainsi, les deux types de dispersion sont observés.

La dispersion de la structure  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}_{[111]}$  représentée à la figure II.16.a est de type positif. Il est claire que la vitesse augmente de celle du substrat,  $V_R(\text{GaAs}) = 2604 \text{ m/s}$  à épaisseur nulle, pour atteindre celle de la couche  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  pour les épaisseurs élevées. Ainsi, la courbe de dispersion peut être divisée en deux régions principales :

- **Région 1** : correspondante aux faibles épaisseurs  $0 < d/\lambda_T < 1,2$ . Dans cet intervalle, la vitesse de phase subit une forte croissance en fonction de  $d/\lambda_T$ . Notons que l'augmentation de la vitesse est plus rapide dans la direction [110] par rapport aux autres directions.
- **Région 2**: correspondante aux  $1,2 < d/\lambda_T < 2$ ; région de saturation. Les vitesses de phase atteignent une saturation dont la valeur est pratiquement égale à la vitesse de Rayleigh de la couche: 2765 m/s, 3125 m/s, et 3229 m/s respectivement pour les directions [111], [100], et [110].

Aussi, les deux directions [100] et [110] de densités et de vitesses transversales similaires ont des pentes initiales identiques. Donc, nous pouvons conclure que les différences dans les courbes de dispersion relatives au substrat de GaAs [111] sont attribuées aux distinctions dans des vitesses longitudinales.

Quant aux deux autres orientations du GaAs menant aux structures  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}_{[100]}$  et  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}_{[110]}$ , les résultats obtenus sont illustrée respectivement sur les figures III.16.b et c. Il est clair que, la dispersion de  $V_R$  en fonction de  $d/\lambda_T$  est de type positif pour la couche  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  d'orientations respectives [100] et [110]. Alors que pour l'orientation [111] de la couche, la dispersion est de type négatif. Ainsi, l'effet de l'anisotropie sur les courbes de dispersion de la vitesse de Rayleigh en fonction de  $d/\lambda_T$  est bien quantifié.



**Figure III.16** Courbes de dispersion de la vitesse de Rayleigh en fonction de l'épaisseur de la couche normalisée,  $d/\lambda_T$ , de la structure  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$ .



Par ailleurs, l'allure générale de cette dispersion suit le comportement typique et habituelle, on note les deux régions distinctes : (i) une région de croissance ou décroissance et (ii) une région de saturation.

- **La première région** : correspond à des valeurs de  $d/\lambda_T$  comprise entre 0 et 1,2 :  $V_R$  subit à une croissance dans les directions [100] et [110] et à une décroissance pour la direction [111] de la couche  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ .
- **La deuxième région** : pour  $d/\lambda_T > 1,2$  : aux les vitesses de Rayleigh prennent des valeurs constantes égales à  $V_R$  de la couche. On retrouve ainsi les caractéristiques de la couche  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ .

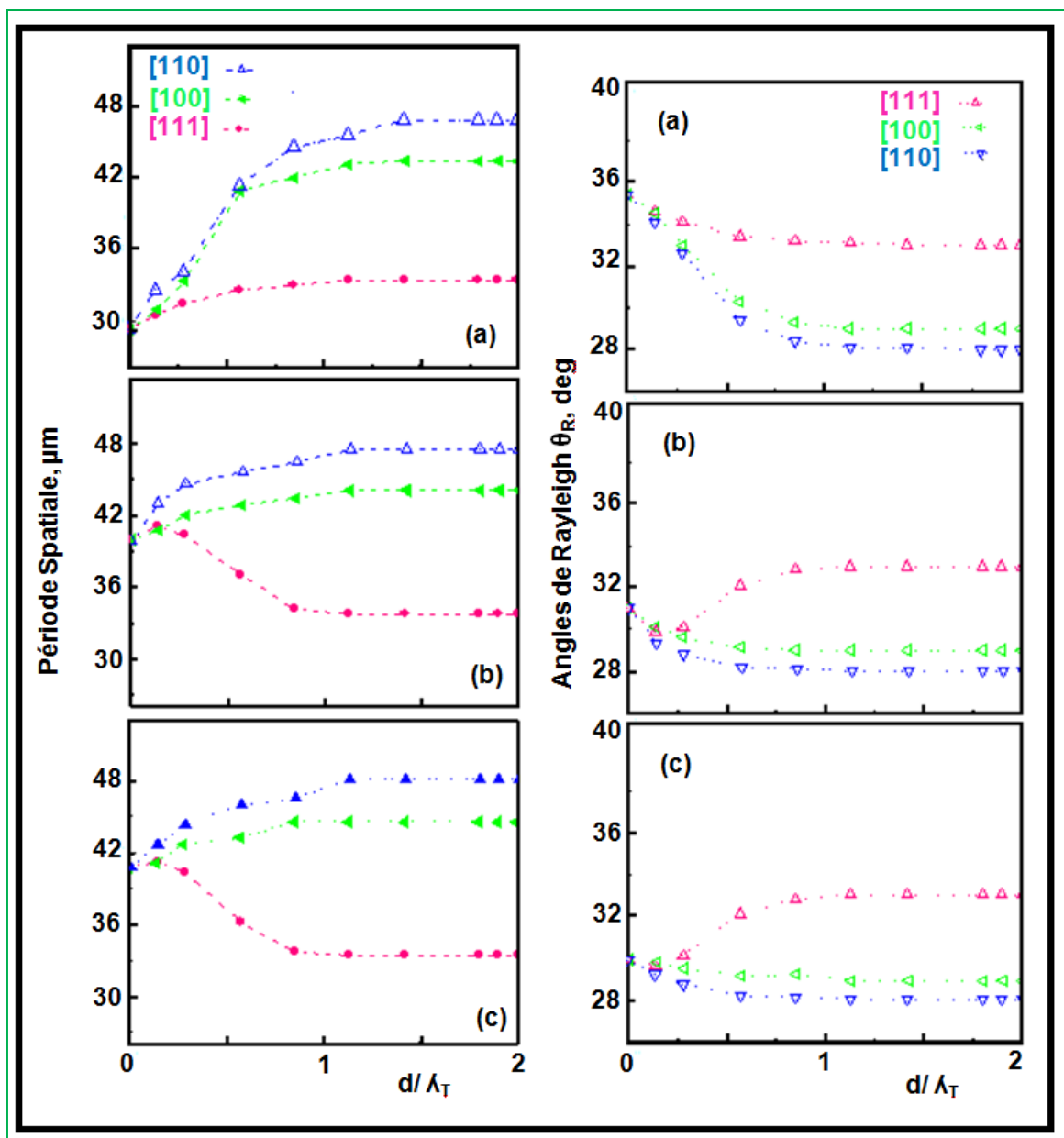
Nous regroupons les valeurs de la vitesse de saturation caractéristiques de la couche pour les deux directions du substrat [100] et [110] dans le tableau (III.8) :

Direction de la couche	Vitesses de saturation caractéristique de la couche $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$		
	[111]	[100]	[110]
GaAs [100]	2774	3138	3255
GaAs [110]	2765	3162	3273

**Tableau III.8** Vitesses de saturation de la structure  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$  pour les directions [100] et [110] du substrat.

### III.8.3 Dispersion de $\Delta z$ et des $\theta_R$ dans la Structure $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$

L'analyse qualitative par FFT des signatures acoustiques,  $V(z)$ , des structures étudiées, pour les différentes directions cristallographiques [111], [100] et [110] et sur un intervalle de l'épaisseur normalisée  $d/\lambda_T$  variant de 0 à  $2\lambda_T$ , nous a permis d'évaluer aussi bien la dispersion de la période  $\Delta z$ , que celui de l'angle critique,  $\theta_R$ . L'ensemble des résultats obtenus est présenté dans la figure III.17. On constate qu'aussi bien  $\Delta z$  que  $\theta_R$ , de la structure  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$ , sont tous les deux influencés par les directions cristallographiques.



**Figure III.17** Influence de l'épaisseur  $d/\lambda_T$  sur la période  $\Delta z$  et les angles critiques  $\theta_R$  à différents directions de la structure  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$ .

De plus, pour une même direction,  $\Delta z$  et  $\theta_R$  sont fortement influencés par l'épaisseur normalisée,  $d/\lambda_T$ . Ainsi, quand  $d/\lambda_T$  varie de 0 à  $2\lambda_T$ ; les deux paramètres considérés : la période spatiale et l'angle critique du mode de Rayleigh varient. Cette étude a bien mis-en évidence l'influence de l'anisotropie sur les propriétés acoustiques de la structure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ .

### III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, les effets de l'anisotropie sur les paramètres acoustiques :  $R(\theta)$ ,  $V(z)$ , angle critiques des modes de propagations longitudinales, transversales et celui de Rayleigh, spectres FFT et périodes spatiales  $\Delta z$ , ont été réalisées. L'étude analytique par simulation acoustique effectuée dans le cas d'un microscope acoustique à balayage SAM, des matériaux étudiés GaAs, AlAs,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , ainsi que la structure  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$ , a bien mis en évidence l'influence de l'anisotropie sur leurs propriétés acoustique. En effet, l'Anisotropie élastique met l'accent sur les différences dans les réponses élastiques d'un matériau dans différentes directions cristallographiques. C'est bien le cas des résultats que nous avons obtenus nos investigations.

Les effets de la fraction d'Al,  $x$ , sur les propriétés élastiques de la structure  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  lorsque  $x$  varie de 0 à 1, ont été quantifiés par des relations qui ont été établies pour les différentes combinaisons. Ainsi pour la vitesse de Rayleigh, nous avons montré qu'elle subit une croissance polynomiale avec des fractions de la forme :

$$V_R = A'x^2 + B'x + C'$$

Où  $A'$ ,  $B'$  et  $C'$  sont des constantes caractéristiques de chaque direction cristallographiques [111], [100] et [110].

D'autre part, cette analyse a également confirmé que la dispersion de : la vitesse du mode de Rayleigh, de la période spatiale ou de l'angle critique, de la structure  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}/\text{GaAs}$  en fonction de l'épaisseur normalisée de la couche  $d/\lambda_T$ , évolue différemment selon la direction cristallographique considérée : [111], [100], ou [110]. Ainsi, pour des valeurs élevées de l'épaisseur et lorsque le paramètre atteint la saturation, il devient possible de dissocier les caractéristiques de la couche de celles du substrat. De plus, l'effet combiné de la couche et du substrat pourrait jouer un rôle important dans les propriétés élastiques de l'ensemble de la structure.

## ***CONCLUSION GENERALE***

---

Dans ce travail, nous avons présenté des notions générales des matériaux semi-conducteurs III-V telle que; GaAs, AlAs, et leurs alliage ternaire  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ . Ces matériaux constituent un domaine technologique très attractif qui est dû à la possibilité de produire de nouveaux matériaux avec des propriétés ajustables qui les rendent de bons candidats pour les applications modernes en électronique et optoélectroniques.

les propriétés élastiques, coefficients de réflexion  $R(\theta)$ , angles critiques des mode de propagations, période spatiale, signatures acoustiques et leurs spectres de FFT des matériaux GaAs, AlAs, et  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , sont bien déterminée et analysée suivant une simulation théorique menée dans le cas d'un microscope acoustique à balayage fonctionnant en mode de réflexion dans les conditions normale qui favorisent l'excitation du mode de Rayleigh.

L'investigation de l'influence de la fraction d'Al,  $x$ , sur les propriétés élastiques des alliages semi-conducteurs AlAs et GaAs a permis de constater que la fraction d'aluminium joue un rôle considérable sur ces propriétés acoustiques, où les vitesses de Rayleigh et longitudinales deviennent plus grandes lors de l'augmentation de la teneur d'Al. En effet,  $V_R$  augmente de 2604 à 3080 m/s, et  $V_L$  augmente de 5364 à 6370 m/s lorsque  $x$  varie de 0 à 1. Ces vitesses acoustiques ont un comportement non linéaire par rapport à la fraction d'Al présentant ainsi un paramètre de flexion. L'influence de la fraction d'Al sur la vitesse de Rayleigh et celle longitudinale été quantifiée par une relation polynomiale de la forme:  $Y = A + B_1 x + B_2 x^2$ . Par ailleurs, la relation de « Viktorov » confirme bien nos résultats relatifs à la vitesse de Rayleigh et obtenus pour la première fois. Aussi, les vitesses longitudinales calculées via les FFT sont en accord raisonnable avec celles données en littérature.

Par ailleurs, nous avons constaté que la période spatiale,  $\Delta z$ , des signaux  $V(z)$  de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$  sont fortement influencés par la fraction d'Al,  $x$ . Quand  $x$  varie de 0 à 1; la période  $\Delta z$  augmente de 29,3 à 42,3  $\mu m$  pour le mode de Rayleigh. Également pour le mode longitudinale,  $\Delta z$  subit une croissance de 134,2 à 190,5  $\mu m$ . De plus, au fur et à mesure que la fraction d'Al augmente, nous avons constatée que tous les angles critiques:  $\theta_L$ ,  $\theta_T$ , et  $\theta_R$  sont réduits.

De plus, l'influence de l'anisotropie sur les propriétés acoustiques ( $R(\theta)$ ,  $V(z)$ , angles critiques des modes des propagations longitudinales, transversales et celui de Rayleigh, spectres FFT et périodes spatiales  $\Delta z$ ), des composés GaAs, AlAs, et de la structure  $Al_xGa_{1-x}As$ , sont déterminés et bien analysée. Nous avons conclu que l'anisotropie élastique met l'accent sur les différences dans les réponses élastiques d'un matériau dans différentes directions cristallographiques [100], [110], et [111]. De plus l'influence de l'anisotropie sur les angles critiques  $\theta_L$ ,  $\theta_T$  et  $\theta_R$  lorsque la fraction d'Al passe de 0 à 1 était quantifiée par une relation linéaire de la forme:  $\theta_C = A'' x + B''$ , où  $A''$  et  $B''$  sont des constantes caractéristiques de chaque angle critique et pour chaque directions cristallographiques.

D'autre part, cette analyse a également confirme que la dispersion de: la vitesse du mode de Rayleigh, la période spatiale, et de l'angle critique, de la structure  $Al_{0.4}Ga_{0.6}As/GaAs$  en fonction de l'épaisseur normalisée de la couche  $d/\lambda_T$ , évolue différemment selon la direction cristallographique considérée: [100], [110], ou [111]. Ainsi, pour des valeurs élevées de l'épaisseur et lorsque le paramètre atteint la saturation, il devient possible de dissocier les caractéristiques de la couche de celles du substrat. De

## *Conclusion Générale*

plus, l'effet combiné de la couche et du substrat pourrait jouer un rôle important dans les propriétés élastiques de l'ensemble de la structure.

En perspective, il nous paraît intéressant si d'autres études s'attèlent à la caractérisation de la structure  $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As})_n/(\text{GaAs})_m$  avec plusieurs nombres  $(n, m)$  de couches déposées et de substrat ou sur différents substrats.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## INTRODUCTION GENERALE

- [1] Zhang, C., Zhang, J., Ma, X., & Feng, Q. (2021). High-Efficiency III-V Single-Junction and Multi-junction Solar Cells. In *Semiconductor Photovoltaic Cells* (pp. 127-175). Springer, Singapore.
- [2] Billaha, M. A. (2022). Study of Structural Parameters on the Characteristics of QWIP. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 1-7.
- [3] Tuan, T. T. A., Kuo, D. H., Thao, C. P., Lan, T. N. P., Van Sau, N., Chinh, T. T. N., & Thuy, C. T. (2022). Fully Sputtered n-AlInGaN/p-Mg-InxGa1-xN ( $x \leq 0.1$ ) Heterojunction Diodes: Electrical Properties Over a Wide Temperature Range. *Journal of Electronic Materials*, 1-9.
- [4] Whitaker, M. D. C., Lioliou, G., Krysa, A. B., & Barnett, A. M. (2020). GaAs/Al<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>As separate absorption and multiplication region x-ray spectroscopic avalanche photodiodes. *Journal of Applied Physics*, 128(1), 015704.
- [5] Priante, D., Janjua, B., Prabaswara, A., Subedi, R. C., Elafandy, R. T., Lopatin, S. & Ooi, B. S. (2017). Highly uniform ultraviolet-A quantum-confined AlGaIn nanowire LEDs on metal/silicon with a TaN interlayer. *Optical Materials Express*, 7(12), 4214-4224.
- [6] Fares F, Bouarissa N, Fares N E & Mezrag F, *Acta Physica Polonica A*, 137 (2020) 489.
- [7] Kawazu T, Noda T & Sakuma Y, *Appl Phys Lett*, 112 (2018) 072101.
- [8] Kilpi O P, Svensson J, Wu J, Persson A R, Wallenberg L R, Lind E & Wernersson L E, *Nano Lett*, 17 (2017) 6006.
- [9] Xie Z X, Yu X, Chen X K, Zhou W X, Shi Y M & Zhang L F, *Appl Phys Lett*, 116 (2020) 143102.
- [10] Swe, H. M. T., Tun, H. M., & Latt, M. M. (2020). Analysis of Quantum-well Heterojunction Emitter Bipolar Transistor Design. *American Journal of Nano Research and Applications*, 8(1), 9-15.
- [11] Gowthaman, N., & Srivastava, V. M. (2021). Dual gate material (Au and Pt) based double-gate MOSFET for high-speed devices. *Revista Tecnología en Marcha*, ág-10.
- [12] Al-Hagan, O. A., Algarni, H., Bouarissa, N., Ajmal Khan, M., & Alhuwaymel, T. F. (2018). Microhardness, phase transition, acoustic wave velocities and melting temperature of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Sb. *International Journal of Modern Physics B*, 32(20), 1850210.

- [13] Zhao, Q., Aqiqi, S., You, J. F., Kria, M., Guo, K. X., Feddi, E., & Yuan, J. H. (2020). Influence of position-dependent effective mass on the nonlinear optical properties in  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  single and double triangular quantum wells. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 115, 113707.
- [14] F. Boufadi, K. Bidai, M. Ameri, A. Bentouafa, D. Bensaida, Y. Azzaza and I. Ameri, *APhysPolA*. 129 (3), 315 (2016).
- [15] R.G. Leissure, K. Foster, J.E. Hightower, D.S. Agosta, *J. Alloys Comp.* 356, 283 (2003).
- [16] V. Kanchana, G. Vaitheeswaran, A. Svane, A. Delin, *J. Phys. Condens. Matter* 18, 9615 (2006).
- [17] Ilchuk, H. A., Korbutyak, D. V., Kashuba, A. I., Andriyevsky, B., Kupchak, I. M., Petrus, R. Y., & Semkiv, I. V. (2020). Elastic properties of  $\text{CdTe}_{1-x}\text{Sex}$  ( $x= 1/16$ ) solid solution: First principles study. *Semicond. Phys., Quant. Electron. & Optoelectron*, 23, 355-360.
- [18] Gupta, M., Khan, M. A., Butola, R., & Singari, R. M. (2021). Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1-22.
- [19] Wang, B., Zhong, S., Lee, T. L., Fancey, K. S., & Mi, J. (2020). Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review. *Advances in mechanical engineering*, 12(4), 1687814020913761.
- [20] Tamulevičius, T., Šimatonis, L., Ulčinas, O., Tamulevičius, S., Žukauskas, E., Rekuviene, R., & Mažeika, L. (2016). Micromachining and validation of the scanning acoustic microscope spatial resolution and sensitivity calibration block for 20–230 MHz frequency range. *Journal of Electron Microscopy*, 65(5), 429-437.
- [21] Mehr, M. Y., Bahrami, A., Fischer, H., Gielen, S., Corbeij, R., Van Driel, W. D., & Zhang, G. Q. (2015, April). An overview of scanning acoustic microscope, a reliable method for non-destructive failure analysis of microelectronic components. In 2015 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (pp. 1-4). IEEE.
- [22] Bouhedja, S., Hadjoub, I., Doghmane, A., & Hadjoub, Z. (2005). Investigation of Rayleigh wave attenuation via annular lenses in acoustic microscopy. *physica status solidi (a)*, 202(6), 1025-1032.
- [23] Maev R (2008) Acoustic microscopy. In: *Fundamentals and Applications*, (Wiley VCH Verlag GmbH & Co, Canada).
- [24] Al-Suraihy, I., Doghmane, A., & Hadjoub, Z. (2013). Ultrasonic Characterization of Co-Additives Effects on Elastic Moduli and Acoustic Properties of  $\text{Li}_{1-x}\text{Co}_x\text{Fe}_2\text{O}_4$ . In *Advanced Materials Research* (Vol. 811, pp. 77-82). Trans Tech Publications Ltd.



- [25] Tliba, L. T., Hadjoub, Z., Touati, I., & Doghmane, A. (2017). Quantification of interatomic distances effects on elastic properties of metals. *Chinese journal of physics*, 55(6), 2614-2620.

## CHAPITRE I

- [1] Yamaguchi, M., Dimroth, F., Geisz, J. F., & Ekins-Daukes, N. J. (2021). Multijunction solar cells paving the way for super high-efficiency. *Journal of Applied Physics*, 129(24), 240901.
- [2] Zhang, C., Zhang, J., Ma, X., & Feng, Q. (2021). High-Efficiency III-V Single-Junction and Multi-junction Solar Cells. In *Semiconductor Photovoltaic Cells* (pp. 127-175). Springer, Singapore.
- [3] Priante, D., Janjua, B., Prabaswara, A., Subedi, R. C., Elafandy, R. T., Lopatin, S., & Ooi, B. S. (2017). Highly uniform ultraviolet-A quantum-confined AlGaIn nanowire LEDs on metal/silicon with a TaN interlayer. *Optical Materials Express*, 7(12), 4214-4224.
- [4] Alassery, F., Khan, A. I., & Shaik, M. S. (2022). Implementation of Advanced Tunnel Field Effect Transistor (DP-TFET) for High Power Switching Applications. *Silicon*, 1-5.
- [5] Gowthaman, N., & Srivastava, V. M. (2021). Dual gate material (Au and Pt) based double-gate MOSFET for high-speed devices. *Revista Tecnología en Marcha*, ág-10.
- [6] Heidelberg, C., Sorace-Agaskar, C., Plant, J. J., Kharas, D., Swint, R. B., Dhingra, P., ... & Juodawlkis, P. W. (2021, October). Efficient Optical Coupling between III-V Semiconductor and SiN x Waveguides via Heteroepitaxial Integration. In *2021 IEEE Photonics Conference (IPC)* (pp. 1-2). IEEE.
- [7] Besancon, C., Néel, D., Make, D., Ramírez, J. M., Cerulo, G., Vaissiere, N., & Decobert, J. (2021). AlGaInAs Multi-Quantum Well Lasers on Silicon-on-Insulator Photonic Integrated Circuits Based on InP-Seed-Bonding and Epitaxial Regrowth. *Applied Sciences*, 12(1), 263.
- [8] Miao, J., & Wang, C. (2021). Avalanche photodetectors based on two-dimensional layered materials. *Nano Research*, 14(6), 1878-1888.
- [9] Roland, I., Ravaro, M., Suffit, S., Filloux, P., Lemaître, A., Favero, I., & Leo, G. (2020). Second-harmonic generation in suspended AlGaAs waveguides: A comparative study. *Micromachines*, 11(2), 229.
- [10] Nishimura, T., Yoshizumi, K., Saito, T., Iizasa, D., Nitta, J., & Kohda, M. (2021). Full spin-orbit coefficient in III-V semiconductor wires based on the anisotropy of weak localization under in-plane magnetic field. *Physical Review B*, 103(9), 094412.
- [11] Shevyrin, A. A., Pogosov, A. G., Bakarov, A. K., & Shklyayev, A. A. (2020). Low-temperature dissipation and its persistent photoinduced change in AlGaAs/GaAs-based nanomechanical resonators. *Applied Physics Letters*, 116(5), 053104.

- [12] Monarkha, Y. P., & Syvokon, V. E. (2012). A two-dimensional Wigner crystal. *Low Temperature Physics*, 38(12), 1067-1095.
- [13] Whitaker, M. D. C., Lioliou, G., Krysa, A. B., & Barnett, A. M. (2020). GaAs/Al<sub>0.8</sub>Ga<sub>0.2</sub>As separate absorption and multiplication region x-ray spectroscopic avalanche photodiodes. *Journal of Applied Physics*, 128(1), 015704.
- [14] Du, M., Cui, X., Yoon, H. H., Das, S., Uddin, M. G., Du, L., & Sun, Z. (2022). Switchable Photoresponse Mechanisms Implemented in Single van der Waals Semiconductor/Metal Heterostructure. *ACS nano*.
- [15] Yang, D., Kim, B., Eom, T. H., Park, Y., & Jang, H. W. (2022). Epitaxial Growth of Alpha Gallium Oxide Thin Films on Sapphire Substrates for Electronic and Optoelectronic Devices: Progress and Perspective. *Electronic Materials Letters*, 1-16.
- [16] Yang, Y., Cao, W., Xu, P., Bai, Y., Zhu, B., Wang, B., ... & Bai, X. (2020, November). Quantum efficiency of transmission-mode graded bandgap Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs photocathode. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1676, No. 1, p. 012220). IOP Publishing.
- [17] Geijselaers, I. (2021). Optical studies of crystal phase heterostructures. Division of Solid State Physics, Department of Physics, Lund University.
- [18] Al-Hagan, O. A., Algarni, H., Bouarissa, N., Ajmal Khan, M., & Alhuwaymel, T. F. (2018). Microhardness, phase transition, acoustic wave velocities and melting temperature of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Sb. *International Journal of Modern Physics B*, 32(20), 1850210.
- [19] Billaha, M. A. (2022). Study of Structural Parameters on the Characteristics of QWIP. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, 1-7.
- [20] Tuan, T. T. A., Kuo, D. H., Thao, C. P., Lan, T. N. P., Van Sau, N., Chinh, T. T. N., & Thuy, C. T. (2022). Fully Sputtered n-AlInGaN/p-Mg-In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N (x ≤ 0.1) Heterojunction Diodes: Electrical Properties Over a Wide Temperature Range. *Journal of Electronic Materials*, 1-9.
- [21] Zhao, Q., Aqiqi, S., You, J. F., Kria, M., Guo, K. X., Feddi, E., & Yuan, J. H. (2020). Influence of position-dependent effective mass on the nonlinear optical properties in Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs single and double triangular quantum wells. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 115, 113707.
- [22] Das, S., Lenka, T. R., Talukdar, F. A., Velpula, R. T., Jain, B., Nguyen, H. P., & Crupi, G. (2022). Effects of polarized-induced doping and graded composition in an advanced multiple quantum well InGaN/GaN UV-LED for enhanced light technology. *Engineering Research Express*.
- [23] Metaferia, W., Schulte, K. L., Simon, J., Guiling, D., & Ptak, A. J. (2020, June). Demonstration of passivation using a low-temperature-grown, Al-containing window layer by HVPE. In *2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)* (pp. 0672-0674). IEEE.

- [24] Sahoo, N., Sahu, A. K., & Palo, S. K. (2021). Electron mobility in asymmetric coupled  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  parabolic quantum well structure—Impact of external electric field. *Physica B: Condensed Matter*, 608, 412798.
- [25] Fares, F., Bouarissa, N., Fares, N. E. H., & Mezrag, F. (2020). Electronic Properties of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}_y\text{As}_{1-y}$  Quaternary Semiconducting Alloys Lattice Matched to GaAs. *GaN*, 33(3.3), 4-5.
- [26] Zhao, C., Xu, B., Wang, Z., & Wang, Z. (2020). Boron-doped III–V semiconductors for Si-based optoelectronic devices. *Journal of Semiconductors*, 41(1), 011301.
- [27] Convertino, C., Zota, C. B., Caimi, D., Sousa, M., Moselund, K. E., & Czornomaz, L. (2019). High-performance InGaAs Fin FETs with raised source/drain extensions. *Japanese Journal of Applied Physics*, 58(8), 080901.
- [28] Caimi, D., Tiwari, P., Sousa, M., Moselund, K. E., & Zota, C. B. (2021). Heterogeneous Integration of III–V Materials by Direct Wafer Bonding for High-Performance Electronics and Optoelectronics. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 68(7), 3149-3156.
- [29] Han, H., Hantschel, T., Strakos, L., Vystavel, T., Baryshnikova, M., Mols, Y., & Caymax, M. (2020). Application of electron channeling contrast imaging to 3D semiconductor structures through proper detector configurations. *Ultramicroscopy*, 210, 112928.
- [30] Adachi, S. (2009). Properties of semiconductor alloys: group-IV, III-V and II-VI semiconductors. John Wiley & Sons.
- [31] Krebs, O., & Voisin, P. (1996). Giant optical anisotropy of semiconductor heterostructures with no common atom and the quantum-confined Pockels effect. *Physical review letters*, 77(9), 1829.
- [32] Du, Y. A., Sakong, S., & Kratzer, P. (2013). As vacancies, Ga antisites, and Au impurities in zinc blende and wurtzite GaAs nanowire segments from first principles. *Physical Review B*, 87(7), 075308.
- [33] Varshney, D., Joshi, G., Varshney, M., & Shriya, S. (2010). Pressure dependent elastic and structural (B3–B1) properties of Ga based monpnictides. *Journal of Alloys and Compounds*, 495(1), 23-32.
- [34] Nandi, U., Mohammadi, M., Lu, H., Norman, J., Gossard, A. C., Alff, L., & Preu, S. (2021). Material properties and performance of ErAs: In (Al) GaAs photoconductors for 1550 nm laser operation. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 39(2), 023407.
- [35] Prashant, D. V., Samajdar, D. P., & Arefinia, Z. (2021). FDTD-based optimization of geometrical parameters and material properties for GaAs-truncated nanopyramid solar cells. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 68(3), 1135-1141.
- [36] Sittig, R., Nawrath, C., Kolatschek, S., Bauer, S., Schaber, R., Huang, J., & Michler, P. (2022). Thin-film InGaAs metamorphic buffer for telecom C-band InAs quantum dots and optical resonators on GaAs platform. *Nanophotonics*.

- [37] Nelson, N. O., & Judith, A. O. (2021). Elastic and mechanical properties of cubic metal arsenides (Ga, In and Al) under high-pressure: a simulation study. *Ruhuna Journal of Science*, 12(1).
- [38] Warlimont, H., & Martienssen, W. (Eds.). (2018). *Springer handbook of materials data*. Springer.
- [39] Liu, C., Ma, M., Yuan, X., Sun, H., Ying, P., Xu, B., He, J. (2017). Metastable phases, phase transformation and properties of AlAs based on first-principle study. *Computational Materials Science*, 128, 337–342.
- [40] Gregušová, D., Dobročka, E., Eliáš, P., Stoklas, R., Blaho, M., Pohorelec, O., ... & Kúdela, R. (2021). GaAs Nanomembranes in the High Electron Mobility Transistor Technology. *Materials*, 14(13), 3461.
- [41] Jeon, N., Ruhstorfer, D., Döblinger, M., Matich, S., Loitsch, B., Koblmüller, G., & Lauhon, L. (2018). Connecting Composition-Driven Faceting with Facet-Driven Composition Modulation in GaAs–AlGaAs Core–Shell Nanowires. *Nano Letters*, 18(8), 5179–5185.
- [42] Pradhan, A., Mukherjee, S., Maitra, T., Mukherjee, S., Nayak, A., & Bhunia, S. (2019). Interface intermixing and Interdiffusion characteristics in MOVPE grown spontaneous  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  (100) superlattice structures using high resolution X-ray diffraction. *Superlattices and Microstructures*.
- [43] P. Kiréev, (1975) « La Physique des semi-conductes », édition Mir, Moscou.
- [44] Vadiee, E., Fang, Y., Zhang, C., Fischer, A. M., Williams, J. J., Renteria, E. J., Honsberg, C. B. (2018). Temperature dependence of GaSb and AlGaSb solar cells. *Current Applied Physics*, 18(6), 752–761.
- [45] Duffy, D. A., Marko, I. P., Fuchs, C., Eales, T. D., Lehr, J., Stolz, W., & Sweeney, S. J. (2021). Performance characteristics of low threshold current 1.25  $\mu\text{m}$  type-II GaInAs/GaAsSb ‘W’-lasers for optical communications. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54(36), 365104.
- [46] Ting, D. Z., Soibel, A., Khoshakhlagh, A., Keo, S. A., Fisher, A. M., Rafol, S. B., & Gunapala, S. D. (2021). Long wavelength InAs/InAsSb superlattice barrier infrared detectors with p-type absorber quantum efficiency enhancement. *Applied Physics Letters*, 118(13), 133503.
- [47] Zhang, C., Zhang, J., Ma, X., & Feng, Q. (2021). High-Efficiency III-V Single-Junction and Multi-junction Solar Cells. In *Semiconductor Photovoltaic Cells* (pp. 127-175). Springer, Singapore.
- [48] M. Benhamida (2014). *Propriétés Structurale, Elastiques Et Electronique D'alliages De Niture Des Métaux De Transitions*.
- [49] Vegard, Lars. "Die konstitution der mischkristalle und die raumfüllung der atome." *Zeitschrift für Physik* 5.1 (1921): 17-26.
- [50] Adachi, S. (1985). GaAs, AlAs, and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ : Material parameters for use in research and device applications. *Journal of Applied Physics*, 58(3), R1-R29.

- [51] Swe, H. M. T., Tun, H. M., & Latt, M. M. (2020). Analysis of Quantum-well Heterojunction Emitter Bipolar Transistor Design. *American Journal of Nano Research and Applications*, 8(1), 9-15.
- [52] Guerinik, A., & Tayeboun, F. (2020). Enhancement in sensitivity of a surface plasmon resonance sensor with  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ , 70% Al. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 92, 125-132.
- [53] Kumari, B., Katti, A., & Alvi, P. A. (2020, February). Absorption in Al 0.20 Ga 0.80 As-GaAs MQWs Heterostructure. In *2020 International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3)* (pp. 1-3). IEEE.
- [54] Sharbati, S., Gharibshahian, I., & Orouji, A. A. (2019). Designing of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /CIGS tandem solar cell by analytical model. *Solar Energy*, 188, 1-9.
- [55] R. L. Anderson, «Experiments on GaAs Heterojunctions », *Solid-State Electron* 5, pp. 341-351, 1962.
- [56] Gain, J., Dassarkar, M., & Kundu, S. (2022). Energy effective mass dependence of electron tunneling through CdS/CdSe,  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ /GaAs and AlSb/InAs Multiple Quantum Barriers. *arXiv preprint arXiv:2203.13358*.
- [57] Yamaguchi, M., Dimroth, F., Geisz, J. F., & Ekins-Daukes, N. J. (2021). Multi-junction solar cells paving the way for super high-efficiency. *Journal of Applied Physics*, 129(24), 240901.
- [58] Akura, M., & Dunn, G. (2019). Investigating the role of band offset on the property and operation of the potential well barrier diodes. *physica status solidi (b)*, 256(5), 1800284.
- [59] Romeira, B., Borme, J., Fonseca, H., Gaspar, J., & Nieder, J. B. (2020). Efficient light extraction in subwavelength GaAs/AlGaAs nanopillars for nanoscale light-emitting devices. *Optics Express*, 28(22), 32302-32315.
- [60] Rebiai-Benahmed, S., (2011). *Composants Optoelectroniques*.
- [61] Sokolovskii, A. A. (2018). Photovoltaic characteristics of AlGaAs-based LEDs. *Technical Physics Letters*, 44(4), 341-343.
- [62] Miller, D. A. B. (2017). Attojoule Optoelectronics for Low-Energy Information Processing and Communications. *Journal of Lightwave Technology*, 35(3), 346–396.
- [63] Hoang, T. X., Ha, S. T., Pan, Z., Phua, W. K., Paniagua-Domínguez, R., Png, C. E., & Kuznetsov, A. I. (2020). Collective Mie resonances for directional on-chip nanolasers. *Nano Letters*, 20(8), 5655-5661.
- [64] Tittel, A., Leitis, A., Liu, M., Yesilkoy, F., Choi, D. Y., Neshev, D. N., & Altug, H. (2018). Imaging-based molecular barcoding with pixelated dielectric metasurfaces. *Science*, 360(6393), 1105-1109.

- [65] Achour, M. B., Dennai, B., & Khachab, H. (2020). Study simulation of top-cell on the performance of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  tandem solar cell. *Digest Journal of Nanomaterials & Biostructures (DJNB)*, 15(2).
- [66] Liu, L., Diao, Y., & Xia, S. (2020). Enhanced optical absorption of gradient-component  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  nanowire arrays for solar cell applications. *Optics Communications*, 477, 126340.
- [67] Cristian, C & Mike, S. (2014). Improved gaas hbt device linearity with flattened cutoff frequency curve. *Cs Mantech Conference, Denver, Colorado, USA*.
- [68] Predusca, G., & Serban, I. M. (2018). Comparative Analysis Of Bipolar Junction Transistors And Heterojunction Bipolar Transistors Using Matlab. *Journal of Science and Arts*, 18(1), 283-296.
- [69] Manh Duy, L. Ryo, I. Yoichiro, T. & Kazuhiko, H. (2017). Microwave Characteristics Of An Independently Biased 3-Stack InGaP/GaAs HBT Configuration. *IEEE Transactions On Circuits And Systems–I: Regular Papers*, 64 (5).
- [70] Aadit, M. N. A., Kirtania, S. G., Afrin, F., Alam, M. K., & Khosru, Q. D. M. (2017). High Electron Mobility Transistors: Performance Analysis, Research Trend and Applications. *Different Types of Field-Effect Transistors - Theory and Applications*.

## CHAPITRE II

- [1] Smith, D. J. (2020). Atomic-resolution structure imaging of defects and interfaces in compound semiconductors. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 66(4), 100498.
- [2] Seebauer, E. G., & Kratzer, M. C. (2006). Charged point defects in semiconductors. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 55(3-6), 57-149.
- [3] Iglesias, V., Wu, Q., Porti, M., Nafria, M., Bersuker, G., & Cordes, A. (2015). Monitoring defects in III–V materials: A nanoscale CAFM study. *Microelectronic Engineering*, 147, 31-36.
- [4] G. Lutz, *Semiconductor Radiation Detectors*, Springer, Berlin, 1999.] [J.W. Fergus, *J. Mater. Sci.* 38 (2003) 4259–4270.
- [5] W. Baiqi, J. Liqiang, Q. Yichun, L. Shudan, J. Baojiang, Y. Libin, X. Baifu, F. Honggang, *Appl. Surf. Sci.* 252 (2006) 2817–2825.
- [6] S.R. Kurtz, A.A. Allerman, E.D. Jones, J.M. Gee, J.J. Banas, B.E. Hammons, *Appl. Phys. Lett.* 74 (1999) 729–731.
- [7] Waller, J. M., Saulsberry, R. L., Parker, B. H., Hodges, K. L., Burke, E. R., & Taming, K. M. (2015, March). Summary of NDE of additive manufacturing efforts in NASA. In *AIP Conference Proceedings (Vol. 1650, No. 1, pp. 51-62)*. American Institute of Physics.

- [8] Ilchuk, H. A., Korbutyak, D. V., Kashuba, A. I., Andriyevsky, B., Kupchak, I. M., Petrus, R. Y., & Semkiv, I. V. (2020). Elastic properties of CdTe<sub>1-x</sub>Se<sub>x</sub> (x= 1/16) solid solution: First principles study. *Semicond. Phys., Quant. Electron. & Optoelectron*, 23, 355-360.
- [9] Gupta, M., Khan, M. A., Butola, R., & Singari, R. M. (2021). Advances in applications of Non-Destructive Testing (NDT): A review. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 1-22.
- [10] Sotelo, L. D., Karunakaran, R., Pratt, C. S., Sealy, M. P., & Turner, J. A. (2021). Ultrasound in situ characterization of hybrid additively manufactured Ti6Al4V. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 150(6), 4452-4463.
- [11] Tamulevičius, T., Šimatonis, L., Ulčinas, O., Tamulevičius, S., Žukauskas, E., Rekuviėnė, R., & Mažeika, L. (2016). Micromachining and validation of the scanning acoustic microscope spatial resolution and sensitivity calibration block for 20–230 MHz frequency range. *Journal of Electron Microscopy*, 65(5), 429-437.
- [12] Phommahaxay A, Wolf J, Hoffrogge P, Brand S, Czurratis P, Philipsen H, Civale Y, Vandersmissen K, Halder S, Beyer G, Swinnen B, Miller A, Beyne E (2013) High frequency scanning acoustic microscopy applied to 3D integrated process: void detection in through silicon vias. In: *Electronic Components & Technology Conference*, USA, Las Vegas 227–231.
- [13] Maev R (2008) *Acoustic microscopy. In: Fundamentals and Applications*, (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Canada.
- [14] Khurjekar, I. D., & Harley, J. B. (2022). Sim-to-real localization: Environment resilient deep ensemble learning for guided wave damage localization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 151(2), 1325-1336.
- [15] F. Boufadi, K. Bidai, M. Ameri, A. Bentouafa, D. Bensaida, Y. Azzaza and I. Ameri, *APhysPolA*. 129 (3), 315 (2016).
- [16] V. Kanchana, G. Vaitheeswaran, A. Svane, A. Delin, *J. Phys. Condens. Matter* 18, 9615 (2006).
- [17] Moussa, R., Abdiche, A., Khenata, R., & Bin-Omran, S. (2019). First principle study of the structural, electronic, optical and thermodynamic properties of the cubic Al<sub>1-x</sub>B<sub>x</sub>As ternary alloys. *Materials Research Express*.
- [18] J. Lemaitre J.L. Chaboche, « *Mécanique des matériaux solides* », Paris, Dunod, 544 (ISBN 2-04-18618-2), (1988).
- [19] Adachi, S. (1985). GaAs, AlAs, and Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As: Material parameters for use in research and device applications. *Journal of Applied Physics*, 58(3), R1-R29.
- [20] M. Levy, H. E. Bass, R. Stern, *Modern Acoustical Techniques for the Measurement of Mechanical Properties*, in : R. Celotta, T. Lucatorto, (EDs.), Vol 39, *Experimental Methods In The Physical Sciences*, Academic Press, New York, USA, 2001.

- [21] A. Briggs, *Advances in Acoustic Microscopy* (Springer Science+Business Media, LLC, Oxford, United Kingdom, 1995), 1.
- [22] A Doghmane, and Z Hadjoub, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 30, (1997) 2777.
- [23] J. I. Kushibiki, and N. Chubachi, *IEEE Transactions On Sonics And Ultrasonics* 32 (2), 189 (1985).
- [24] Brekhovskikh L M, *Waves in Layered Media*, Academic Press, London, (1980).
- [25] Sheppard C J R & Wilson T, *Appl Phys Lett*, 38 (1981) 858.
- [26] Mehr, M. Y., Bahrami, A., Fischer, H., Gielen, S., Corbeij, R., Van Driel, W. D., & Zhang, G. Q. (2015, April). An overview of scanning acoustic microscope, a reliable method for non-destructive failure analysis of microelectronic components. In 2015 16th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (pp. 1-4). IEEE.
- [27] Zhao, Y., Zhou, X., & Huang, G. (2020). Non-reciprocal Rayleigh waves in elastic gyroscopic medium. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 143, 104065.
- [28] Yang, W., Liang, X., Deng, Q., & Shen, S. (2020). Rayleigh wave propagation in a homogeneous centrosymmetric flexoelectric half-space. *Ultrasonics*, 103, 106105.
- [29] Al Wardany, R., Rhazi, J., Ballivy, G., Gallias, J. L., & Saleh, K. (2004). Use of Rayleigh wave methods to detect near surface concrete damage. In 16th WCNDT.
- [30] Kushibiki, J. I., Ono, Y., Ohashi, Y., & Arakawa, M. (2002). Development of the line-focus-beam ultrasonic material characterization system. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 49(1), 99-113.
- [31] Viktorov L, *Rayleigh and Lamb Waves*, Plenum Press, New York, (1967).
- [32] Doghmane A, Hadjoub Z, Alami K, Saurel J M & Attal J, *J Acoust Soc Am*, 92 (1992) 1545.
- [33] Briggs A, *Rep Prog Phys*, 55 (1992) 851.
- [34] Filali W, Sengouga N, Oussalah S, Mari R H, Jameel D, Al Saqri N A, Aziz M, Taylor D & Henini M, *Superlattice Microstruct*, 111 (2017) 1010.
- [35] Sharbati S, Gharibshahian I & Orouji A A, *Solar Energy* 188 (2019) 1.
- [36] Liu L, Diao Y & Xia S, *Opt Commun*, 477 (2020) 126340.
- [37] Rana M M, Khan S M F & Shafayat M S, 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT), Brac University, Bangladesh, IEEE (2019).
- [38] Zhang, C., Zhang, J., Ma, X., & Feng, Q. (2021). High-Efficiency III-V Single-Junction and Multi-junction Solar Cells. In *Semiconductor Photovoltaic Cells* (pp. 127-175). Springer, Singapore.



- [39] Yamaguchi, M., Dimroth, F., Geisz, J. F., & Ekins-Daukes, N. J. (2021). Multi-junction solar cells paving the way for super high-efficiency. *Journal of Applied Physics*, 129(24), 240901.
- [40] Kumari B, Katti A & Alvi P A, International Conference on Emerging Trends in Communication, Control and Computing (ICONC3), Mody University of Science & technology, Lakshmangarch, India, IEEE (2020).
- [41] Whitaker M D C, Lioliou G, Krysa A B & Barnett A M, *J Appl Phys*, 128 (2020) 015704.
- [42] Zhao Q, Aqiqi S, You J F, Kria M, Guo K X, Feddi E, Zhang Z H & Yuan J H, *Physica E*, 115 (2020) 113707.
- [43] Flores Y V & Albo A, *IEEE J Quant Electron*, 53 (2017) 1.
- [44] Feng C, Zhang Y, Qian Y, Wang Z, Liu J, Chang B, Shi F & Jiao G, *Optics Commun*, 413 (2018) 1.
- [45] Solaimani M, *Eur Phys J Plus*, 135 (2020) 1.
- [46] Akura M & Dunn G, *Physica Status Solidi (b)*, 256 (2019) 1800284.
- [47] Koudriavtseva O, Kudriavtsev Y, Escobosa A & Sánchez-R V M, 8th International Caribbean Conference on Devices, Circuits and Systems (ICDCS), Playa Del Carmen, Mexico, IEEE, (2012).
- [48] Lal P, Dixit S, Dalela S, Rahman F & Alvi P A, *Physica E*, 46 (2012) 224.
- [49] Guerinik A & Tayeboun F, *Prog Electromagn Res Lett*, 92 (2020) 125.
- [50] Ash, E. A., & Paige, E. G. S. (Eds.). (1985). *Rayleigh-Wave Theory and Application*. Springer Series on Wave Phenomena.
- [51] Singh, B., & Kaur, B. (2020). Rayleigh-type surface wave on a rotating orthotropic elastic half-space with impedance boundary conditions. *Journal of Vibration and Control*, 26(21-22), 1980-1987.

### CHAPITRE III

- [1] Tuan, T. T. A., Kuo, D. H., Thao, C. P., Lan, T. N. P., Van Sau, N., Chinh, T. T. N., & Thuy, C. T. (2022). Fully Sputtered n-AlInGa<sub>N</sub>/p-Mg-In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N ( $x \leq 0.1$ ) Heterojunction Diodes: Electrical Properties Over a Wide Temperature Range. *Journal of Electronic Materials*, 1-9.
- [2] Zhao, Q., Aqiqi, S., You, J. F., Kria, M., Guo, K. X., Feddi, E., & Yuan, J. H. (2020). Influence of position-dependent effective mass on the nonlinear optical properties in Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/GaAs single and double triangular quantum wells. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 115, 113707.

- [3] Zhang, X., Wang, Q. J., & He, T. (2020). Transient and steady-state viscoelastic contact responses of layer-substrate systems with interfacial imperfections. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 145, 104170.
- [4] He, T., Wang, Q. J., Zhang, X., Liu, Y., Li, Z., Kim, H. J., & Pack, S. (2021). Visco-elastohydrodynamic lubrication of layered materials with imperfect layer-substrate interfaces. *International Journal of Mechanical Sciences*, 189, 105993.
- [5] Gu, Y., Wang, Z., Peng, S., Ma, T., & Luo, J. (2021). Quantitative measurement of transfer film thickness of PTFE based composites by infrared spectroscopy. *Tribology International*, 153, 106593.
- [6] Wang, Z., Tian, G., Meo, M., & Ciampa, F. (2018). Image processing based quantitative damage evaluation in composites with long pulse thermography. *Ndt & E International*, 99, 93-104.
- [7] Doghmane, A., and Hadjoub, Z., *J. Phys. D: Appl. Phys.* 30, (1997) 2777
- [8] Hadjoub Z, Alami K, Doghmane A, Saurel J M & Attal J, *Electron Lett*, 27 (1991) 981.
- [9] Zhang, C., Zhang, J., Ma, X., & Feng, Q. (2021). High-Efficiency III-V Single-Junction and Multi-junction Solar Cells. In *Semiconductor Photovoltaic Cells* (pp. 127-175). Springer, Singapore.
- [10] Al-Hagan, O. A., Algarni, H., Bouarissa, N., Ajmal Khan, M., & Alhuwaymel, T. F. (2018). Microhardness, phase transition, acoustic wave velocities and melting temperature of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ . *International Journal of Modern Physics B*, 32(20), 1850210.
- [11] Feng, C., Zhang, Y., Qian, Y., Wang, Z., Liu, J., Chang, B., Jiao, G. (2018). High-efficiency  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$  cathode for photon-enhanced thermionic emission solar energy converters. *Optics Communications*, 413, 1–7.
- [12] Liu, L., Diao, Y., & Xia, S. (2020). Enhanced optical absorption of gradient-component  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  nanowire arrays for solar cell applications. *Optics Communications*, 477, 126340.
- [13] Tamulevičius, T., Šimatonis, L., Ulčinas, O., Tamulevičius, S., Žukauskas, E., Rekuviene, R., & Mažeika, L. (2016). Micromachining and validation of the scanning acoustic microscope spatial resolution and sensitivity calibration block for 20–230 MHz frequency range. *Journal of Electron Microscopy*, 65(5), 429-437.
- [14] Chen, J., Liu, X., Tian, Y., Zhu, W., Yan, C., Shi, Y., & Zhou, K. (2022). 3D-Printed Anisotropic Polymer Materials for Functional Applications. *Advanced Materials*, 34(5), 2102877.
- [15] Javanbakht, M., & Aadaei, M. (2019). Investigating the effect of elastic anisotropy on martensitic phase transformations at the nanoscale. *Computational Materials Science*, 167, 168-182.
- [16] Niekel, F., Spieckera, E., Bitzeka, E. (2015). Influence of anisotropic elasticity on the mechanical properties of fivefold twinned nanowires. *Mechanics and Physics of Solids*, 15.

- [17] R.S. Lakes, K. Elms, Indentability of conventional and negative Poisson's ratio foams, *J. Compos. Mater.* 27 (12) (2016) 1193–1202
- [18] Daniel, R., Meindlhumer, M., Baumegger, W., Todt, J., Zalesak, J., Ziegelwanger, T., & Keckes, J. (2019). Anisotropy of fracture toughness in nanostructured ceramics controlled by grain boundary design. *Materials & Design*, 161, 80-85.
- [19] C. ZENER. (1948). Theory of Strain Interaction of Solute Atoms. *Institute for the Study of Metals*, N, 9, (74), 16.
- [20] Adachi, S. (1985). GaAs, AlAs, and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ : Material parameters for use in research and device applications. *Journal of Applied Physics*, 58(3), R1-R29.
- [21] Levy M, Bass H E & Stern R, *Modern Acoustical Techniques for the Measurement of Mechanical Properties*, Academic Press, London, (2001).
- [22] Kushibiki J I & Chubachi N, *IEEE Trans Sonics Ultrason*, 32 (1985) 189.
- [23] Brekhovskikh L M, *Waves in Layered Media*, Academic Press, London, (1980).
- [24] Sheppard C J R & Wilson T, *Appl Phys Lett*, 38 (1981) 858.
- [25] Briggs A, *Rep Pro Phys*, 55 (1992) 851.
- [26] Viktorov L, *Rayleigh and Lamb Waves*, Plenum Press, New York, (1967).

**ملخص:** تمت دراسة و تحليل الوسائط المرنة للمواد GaAs و AlAs و مركباتها الثلاثية ( $0 \leq x \leq 1$ ) بواسطة المجهرية الصوتية. اعتبرنا تأثيرات تركيز Al ،  $x$  ، و تباين المواد على عدة وسائط: معامل الانعكاس، الإمضاء الصوتي،  $V(z)$ ، الزوايا الحرجة للأنماط المنعكسة، الدور الفضائي لـ  $V(z)$ ، أطياف FFT و سرعات الأمواج الموافقة لها، حيث قمنا بتحليلها ومناقشتها. بينت النتائج المتحصل عليها أنه عندما يزداد نسبة Al، يظهر العديد من السلوكيات: (أ) تتخفض جميع الزوايا الحرجة للأنماط المختلفة (الطولية و العرضية و رايلي)، (ب) تزداد جميع الفترات المكانية و (ج) تزداد سرعة أمواج رايلي الطولية. علاوة على ذلك، أكد هذا التحليل أيضاً تبديد وسائط البنية  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  بدالة السمك المنضم للطبقة،  $d/\lambda_T$ ، يتغير مع مختلف الاتجاهات البلورية المعتبرة: [111]، [100] أو [110]. علاوة على ذلك، تم تحديد الاختلافات في الوسائط،  $P$ ، وتم العثور على صيغ شبه تجريبية بالشكل:  $P = Ax^2 + Bx + C$  حيث أن هذه الصيغ، تمكننا من استنتاج معلومات جد قيمة ومهمة من أجل تمييز البنية  $Al_{0,4}Ga_{0,6}As/GaAs$ .

**الكلمات المفتاحية:**  $Al_xGa_{1-x}As$ ، الوسائط المرنة، المجهرية الصوتية، الإمضاء الصوتي، معامل الانعكاس.

**Abstract:** Elastic parameters of GaAs, AlAs and  $Al_xGa_{1-x}As$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) alloys are numerically determined and analyzed on the basis of scanning acoustic microscopy technique. Thus, the dependence of Al concentrations,  $x$ , and material anisotropy on all features of reflection coefficient and acoustic materials signatures, critical angles of reflected modes, spatial periods, peaks of FFT spectra and their corresponding wave velocities, has been considered, analyzed and discussed. It is found that as Al content increases several behaviors are obtained: (i) all critical angles of longitudinal, transverse and Rayleigh waves, decrease, (ii) all spatial periods increase and (iii) both Rayleigh and longitudinal wave velocities increase. Moreover, this analysis also confirmed that the dispersion of the parameters of the  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  structure as a function of the normalized thickness of the  $d/\lambda_T$  layer, differently change with the considered crystallographic direction: [111], [100] or [110]. Furthermore, the variations of these parameters,  $P$ , were quantified and semi-empirical formulas were found to be of the form:  $P = Ax^2 + Bx + C$ ; from these formulas, valuable information can be derived and are of great importance for  $Al_{0,4}Ga_{0,6}As/GaAs$  structure characterization.

**Key words:**  $Al_xGa_{1-x}As$ , Elastic parameters, Scanning acoustic microscopy, Acoustic materials signatures, Reflection coefficient.

**Résumé :** Les paramètres élastiques des matériaux GaAs, AlAs et leurs alliages ternaires  $Al_xGa_{1-x}As$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) sont déterminés et analysés selon la technique de la microscopie acoustique à balayage. Ainsi, les effets de la fraction de l'aluminium,  $x$ , et de l'anisotropie des matériaux sur plusieurs paramètres,  $P$ , (coefficient de réflexion, signatures acoustiques, angles critiques des modes réfléchis, périodes spatiales des  $V(z)$ , spectres de FFT et vitesses d'onde correspondantes) ont été considérés, analysés et discutés. Il a été démontré que lorsque la fraction d'Al augmente, plusieurs comportements sont obtenus : (i) tous les angles critiques des différents modes (longitudinale, transversale et Rayleigh) diminuent, (ii) toutes les périodes spatiales augmentent et (iii) les vitesses des ondes de Rayleigh et des Skimming augmentent. Par ailleurs, cette analyse a également confirmé que la dispersion des paramètres de la structure  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  en fonction de l'épaisseur normalisée de la couche  $d/\lambda_T$ , évolue différemment selon la direction cristallographique considérée : [111], [100] ou [110]. De plus, les variations des paramètres,  $P$ , ont été quantifiées et des formules semi-empiriques ont été déterminées de la forme :  $P = Ax^2 + Bx + C$  ; à partir de ces formules, des informations précieuses peuvent être déduites et qui sont d'une importance capitale pour la caractérisation de la structure  $Al_{0,4}Ga_{0,6}As/GaAs$ .

**Mots clés :**  $Al_xGa_{1-x}As$ , Paramètres élastiques, Microscopie acoustique, Signatures acoustiques, Coefficient de réflexion.