

INTRODUCTION

L'importante croissance des semi-conducteurs au niveau mondial est liée au fait que ces matériaux forment la base de la révolution technologique de ces quarante dernières années dans le domaine de l'électronique qui, au sens large représente le marché mondial le plus important à l'heure actuelle en même temps que celui qui bénéficie de la croissance la plus rapide. Les matériaux semi-conducteurs interviennent principalement en microélectronique (dominée par le Silicium), dans les domaines radiofréquences et hyperfréquences; applications militaires et spatiales ainsi qu'en optoélectronique. L'activité de recherche concernant la microélectronique, est importante et porte sur la recherche de nouveaux matériaux, de nouveaux procédés, de nouvelles architectures de transistors pour répondre à des besoins différents (calcul logique, mémoires, analogique,...).

I.1-Propriétés des matériaux III-V

Les matériaux III-V sont constitués des éléments des colonnes IIIb et Vb de la classification périodique des éléments. Le tableau (I-1)[1] regroupe un extrait de cette classification (les chiffres en haut et en bas représentent respectivement le nombre atomique et la masse atomique). Ainsi, de nombreux composés binaires peuvent être réalisés.

<i>IIIb</i>	<i>IVb</i>	<i>Vb</i>
13 Al 26,98	14 Si 28,09	15 P 30,97
31 Ga 69,74	32 Ge 72,59	33 As 74,92
49 In 114,82	50 Sn 118,69	51 Sb 121,75

Tableau I-1 : extrait de la classification périodique des éléments.

L'étude de leur structure de bandes montre toutefois, que les éléments les plus légers donnent des composés dont la bande interdite est large et indirecte, et dans laquelle la masse effective des électrons est élevée. Des matériaux, comme les composés contenant du bore, ou de l'aluminium, sont ainsi moins intéressants pour l'électronique rapide. Le tableau (I-2) résume cette situation en donnant l'énergie E_g de bande interdite, la masse effective m^*/m_0 (où m^* et m_0 sont respectivement la masse effective et la masse de l'électron dans le vide) des électrons du bas de la bande de conduction, la mobilité électronique à champ faible μ et le paramètre cristallin a et α (Γ) coefficient de non parabolicité de la vallée Γ . Des semi-conducteurs binaires comme l'arséniure de gallium (GaAs), l'antimoniure de gallium (GaSb), le phosphore d'indium (InP), l'arséniure d'indium (InAs), l'arséniure d'aluminium (AlAs), mais également les alliages ternaires et quaternaires qui en découlent, présentent des propriétés très intéressantes pour les applications hyperfréquences. Ces alliages ternaires et

quaternaires sont réalisés par substitution partielle de l'un des éléments par un élément de la même colonne. On sait, par exemple, obtenir des alliages du type $Ga_xAl_{1-x}As$ ou du type $Ga_xIn_{1-x}As$.

Composé III-V	E_g (eV)	m^*/m_0	μ ($cm^2/V.s$)	a (Å)	α (Γ) (mev/k)
B N	7,5			3,6150	0.593
Al P	2,45			5,4510	0.5771
Al As	2,16			5,6605	0.885
Al Sb	1,58	0,12	200	6,1355	0.420
B P	2,0			4,5380	
Ga N	3,36	0,19	380	4.50	0.593
Ga P	2,26	0,82	110	5,4512	0.5771
Ga As	1,42	0,067	8500	5,6533	0.5405
Ga Sb	0,72	0,042	5000	6,0959	0.417
In P	1,35	0,077	4600	5,8686	0.363
In As	0,36	0,023	33000	6,0584	0.276
In Sb	0,17	0,0145	80000	6,4794	0.320

Tableau I-2 : propriétés des principaux composés binaires III-V à 300 K.

Représente les variations de l'énergie de bande interdite en fonction du paramètre cristallin a qui varie lui même avec la composition. Les points du graphe figurent la position des composés binaires stœchiométriques, et les lignes représentent l'évolution du gap E_g et du paramètre cristallin a , en fonction de la composition des alliages ternaires. Certaines lignes présentent un point anguleux qui dénote une transition entre un gap direct et un gap indirect. Ce diagramme est donc très important parce qu'il permet de connaître la

composition de tout alliage ternaire susceptible d'être déposé en couche mince, par épitaxie, sur un substrat binaire comme GaAs ou InP. Les matériaux III-V offrent donc une grande variété de compositions permettant de modifier leurs propriétés électroniques.

I.2-Structure cristalline

La plupart des matériaux III-V cristallisent dans la structure sphalérite dite "Zinc Blende" présentée sur la figure (I-1). Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant (C, Ge, Si, etc.), est constituée de deux sous-réseaux cubique face centrée (cfc), l'un d'éléments III et l'autre d'éléments V, décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale, c'est-à-dire de $a\sqrt{\frac{3}{4}}$ [111], où a représente le paramètre de maille du matériau.

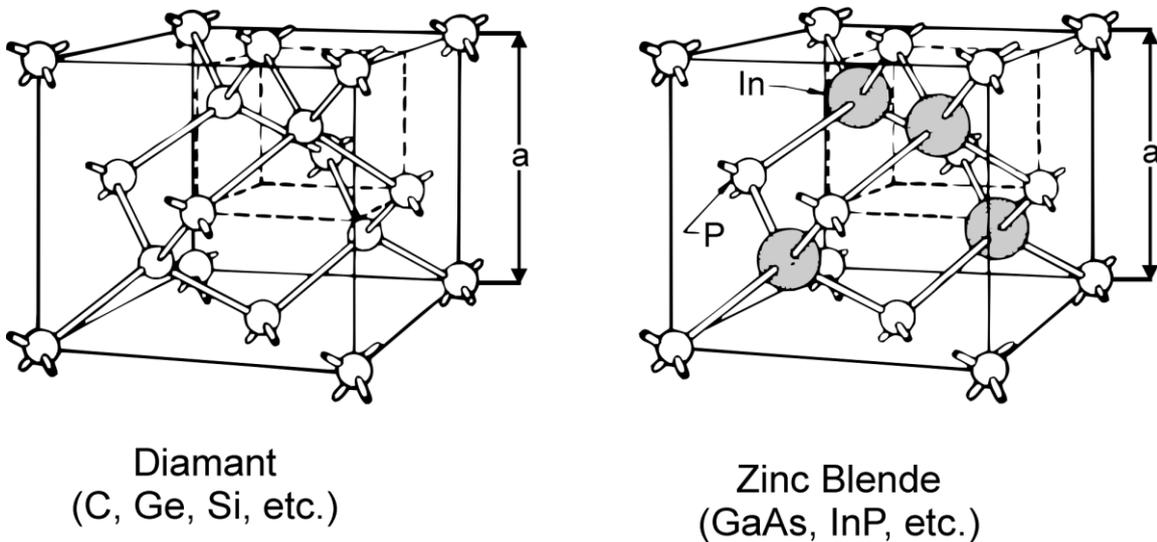


Figure I-1 : mailles cristallographiques des structures Diamant et Zinc Blende.

De ce fait, dans les matériaux III-V, les liaisons atomiques ne sont pas simplement covalentes comme dans le silicium. Elles reposent sur le transfert d'électrons des atomes du groupe V sur ceux du groupe III. Dans le cas du phosphore d'indium, le

Les points de rencontre de chacun de ces axes avec les frontières de la zone de Brillouin jouent un rôle essentiel dans la théorie des bandes. On les note généralement de la manière suivante :

- points X de coordonnées $(2\pi/a, 0, 0)$ sur les axes $\langle 100 \rangle$.
- points L de coordonnées $(\pi/a, \pi/a, \pi/a)$ sur les axes $\langle 111 \rangle$.
- points K de coordonnées $(0, 3\pi/2a, 3\pi/2a)$ sur les axes $\langle 011 \rangle$.

Il est à noter que les deux sous-réseaux cfc de la structure Zinc Blende, du fait de leur décalage $a/4$ [111], ne sont pas centrosymétriques. Il en découle des propriétés physiques différentes suivant les directions cristallographiques considérées. On peut notamment citer l'anisotropie d'attaque chimique et l'anisotropie des caractéristiques mécaniques. Ainsi, comme l'illustre la figure (I-5-b), les substrats sont repérés par des méplats (un petit et un grand) qui permettent le repérage des directions cristallographiques.

I.3-Structure des bandes d'énergie :

La description la plus significative des surfaces d'énergie offertes aux électrons s'effectue dans l'espace réciproque ou espace des vecteurs d'onde k [3]. On simplifie généralement cette description en considérant les variations de l'énergie E en fonction de k selon les directions de plus haute symétrie de cet espace. Dans ces directions, et en se limitant à la première zone de Brillouin, la structure des bandes dans les composés III-V, qui nous intéressent, présente l'allure typique de la figure (I-6) représentant la structure de bandes .

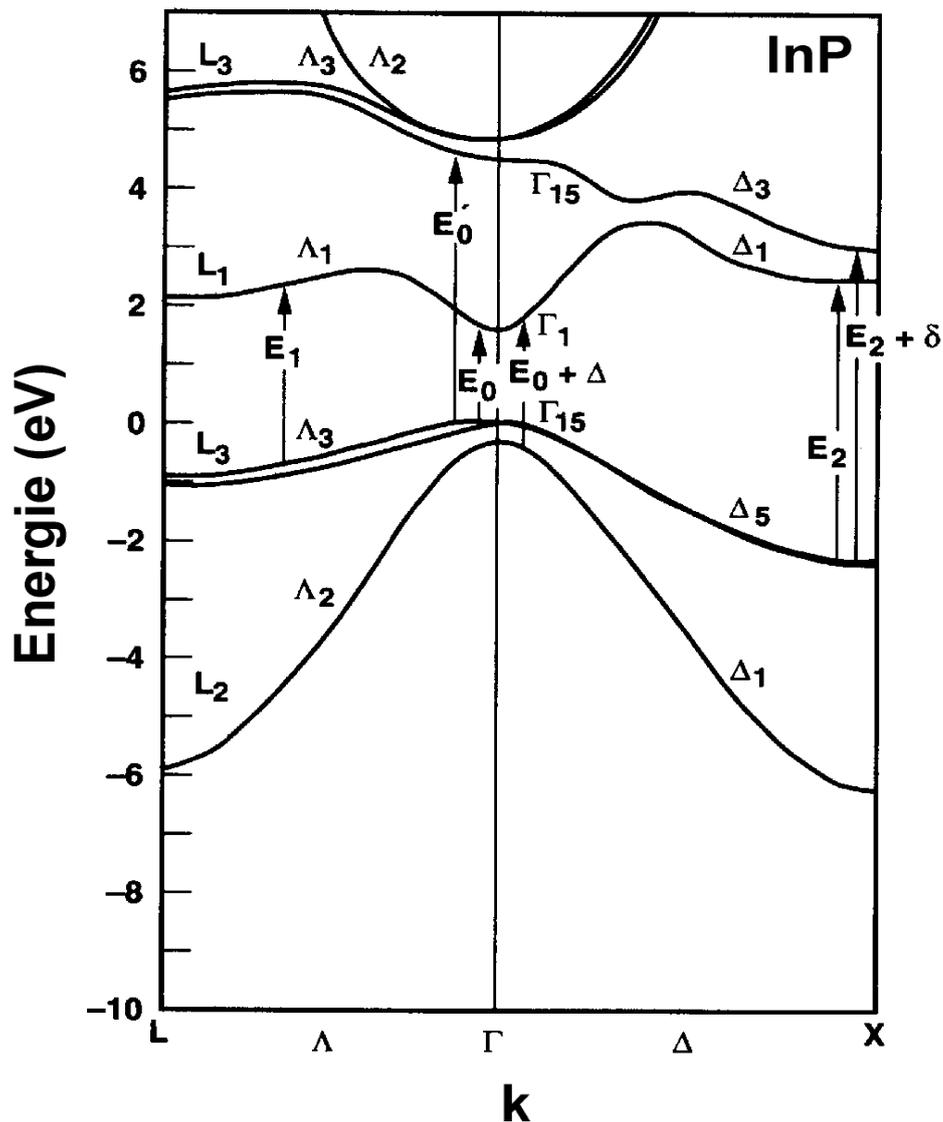


Figure I-3 : structure de bandes du phosphore d'indium au centre de la zone de Brillouin (à titre d'exemple).

Les bandes de conduction et de valence sont multiples, mais les propriétés de transport électronique dépendent principalement de la structure de la bande de conduction la plus basse (BC) et de celle de la bande de valence la plus élevée (BV). Les semi-conducteurs III-V que nous utiliserons sont à "transitions directes". Cela signifie que l'énergie minimale Γ_1 de la bande de conduction et l'énergie maximale Γ_{15} de la bande de valence sont localisées au centre de la zone de Brillouin. Ceci a des conséquences importantes du point de vue des propriétés électroniques et optiques. La bande de conduction présente par ailleurs une courbure généralement très accentuée au

voisinage de son minimum Γ . La masse effective des électrons étant inversement proportionnelle à cette courbure, ceci explique pourquoi, dans les semi-conducteurs III-V à bande interdite directe comme GaAs, InP, GaInAs, etc., la masse effective des électrons en Γ est très faible et, par conséquent, la mobilité électronique élevée.

On note également la présence de deux vallées latérales sur la bande de conduction, en bordure de la zone de Brillouin : vallée L dans la direction $\langle 111 \rangle$ et vallée X dans la direction $\langle 100 \rangle$. Réparties dans l'espace, il existe quatre vallées de type L équivalentes et trois de type X . Ces vallées sont caractérisées par une courbure faible et, par conséquent, par des électrons ayant une masse effective élevée et une faible mobilité. La structure de bandes permet de mieux comprendre certains mécanismes que nous allons maintenant décrire.

I.4-La saturation de vitesse :

Dans certains matériaux comme GaAs et InP, les minima de ces vallées satellites et le minimum Γ sont séparés par une énergie de l'ordre de quelques dixièmes d'électronvolt. Ils sont donc accessibles à des électrons ayant gagné de l'énergie par un quelconque mécanisme.

Considérons par exemple un ensemble d'électrons dont l'énergie \mathcal{E} se situe au voisinage du minimum Γ . Leur masse effective est faible et leur mobilité élevée. S'ils gagnent de l'énergie en s'échauffant dans un champ électrique intense, ils vont monter dans la vallée Γ et pouvoir être portés à un niveau énergétique égal ou supérieur au minimum de L ou X . Une collision avec un phonon leur communiquant le complément d'impulsion nécessaire peut alors les "transférer" dans l'une des vallées satellites. Les électrons transférés voient leur énergie cinétique diminuer de l'énergie de transfert $\Delta\mathcal{E}$ et ont une masse effective très accrue. Ils sont alors brusquement ralentis. Cette situation est à l'origine de la saturation de vitesse de transport v des électrons, observée dans les matériaux III-V, lorsque le champ électrique E augmente (courbe $v(E)$ présentant une décroissance en champs forts) [3].

I.5-Les hétérostructures de matériaux :

Les transistors HEMT sont des composants dont le fonctionnement repose sur l'existence d'hétérojonctions semi-conducteur/semi-conducteur. En effet, le changement abrupt de structure de bandes à l'hétéro-interface entre deux semi-conducteurs conduit à l'apparition de discontinuités (*offsets*) à la jonction des bandes de conduction ou de valence, c'est-à-dire à des sauts de potentiel. Cela est illustré par le diagramme de bandes d'une hétérojonction dont l'établissement nécessite la connaissance de l'affinité électronique des deux semi-conducteurs. L'application des règles d'Anderson [4] permet de déterminer les positions respectives des bandes de valence et de conduction à l'interface. La forme de la barrière dépend alors de la différence des travaux d'extraction et de la position du niveau de Fermi dans les deux matériaux.

La particularité des composants à hétérostructures résulte de leur capacité à contrôler le flux et la distribution des électrons et des trous à travers ces décalages de bandes. Leurs progrès n'ont été rendus possible que par l'avancée des techniques d'épitaxie, et notamment de l'épitaxie par jets moléculaires.

Les hétérojonctions sont classées en différents types suivant le type d'*offset* qui se produit à l'hétérojonction abrupte de semi-conducteurs. Dans l'hétérojonction de type I, figure (I-7-a), les *offsets* de bande pour la bande de conduction et de valence agissent comme des barrières de potentiel et gardent les électrons et les trous dans le matériau de plus petit gap. Les hétérojonctions de type II sont à *gap* décalé, figure I-7-b, ou brisé, figure (I-7-c). Dans ces situations, électrons et trous sont alors séparés dans l'espace, avec les électrons diffusant dans un matériau et les trous dans l'autre.

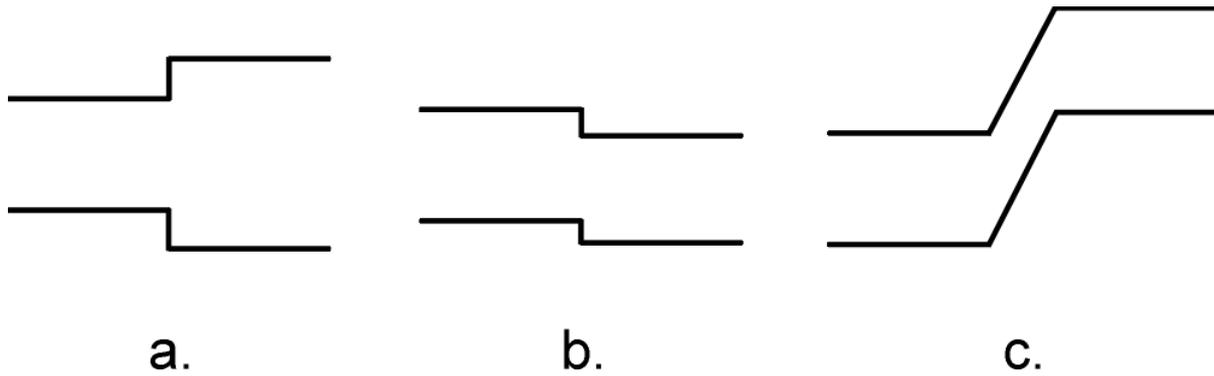


Figure I-4 : diagrammes schématiques montrant les différents types d'hétérojonction.

Dans le cas du HEMT, l'hétérojonction la plus importante est sans doute celle que nous avons décrite précédemment, à savoir l'hétérojonction permettant le transport horizontal d'électrons dans un gaz bidimensionnel. En effet, cette hétérojonction va contribuer à définir des filières de composants comme nous le verrons au paragraphe suivant. Toutefois, nous pouvons voir sur la figure (I-8), représentant la structure des bandes de valence et de conduction d'un HEMT, que chaque hétérojonction a de l'importance dans la mesure où les transports horizontaux et verticaux des électrons et des trous s'en trouvent influencés[5].

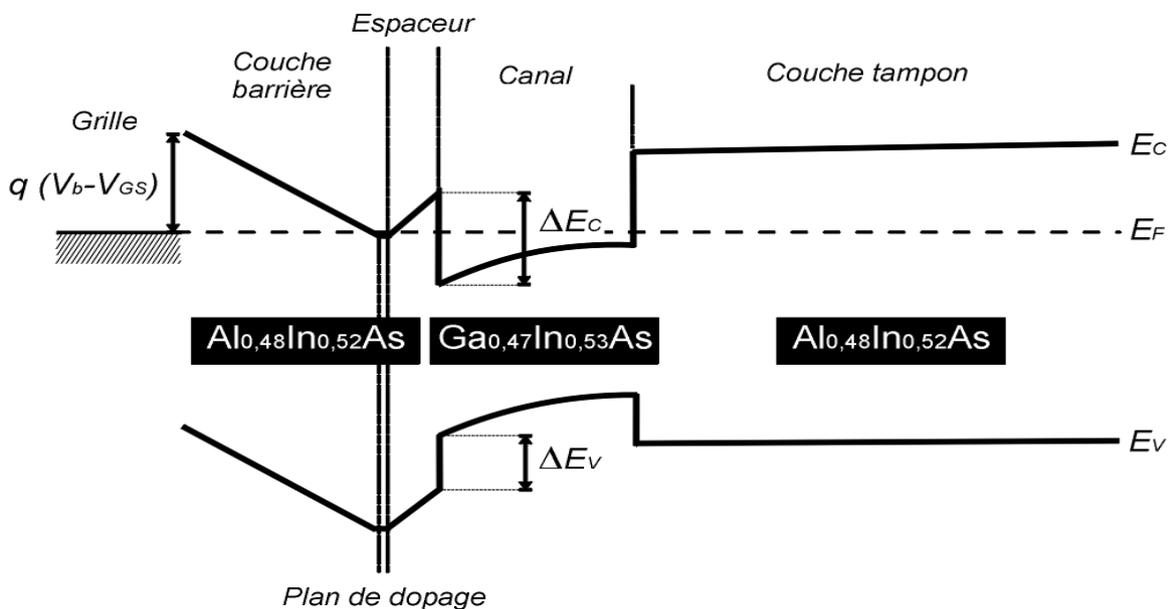


Figure I-5 : représentation des bandes de conduction et de valence d'un HEMT AlInAs/GaInAs adapté en maille sur InP comportant un plan de dopage.

Lorsqu'on incorpore de l'indium dans AlAs (Arséniure d'aluminium) en substitution à l'aluminium, l'encombrement stérique de l'indium étant supérieur à celui de l'aluminium, il va en résulter une augmentation du paramètre de maille du composé. La variation est en première approximation linéaire avec x .

Si on veut obtenir un accord de maille parfait entre $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ et InP sachant que les paramètres de maille sont respectivement

$$a = 5.65 + 0.4x \text{ et } 5.86 \text{ \AA}$$

$a(\text{AlInAs}) = a(\text{InP}) = 5.86 \text{ \AA}$. Cet accord de maille est réalisé pour $x = 0.52$

Donc l'alliage obtenu est: $\text{Al}_{0.52}\text{In}_{0.48}\text{As}$

CONCLUSION

Dans ce chapitre on a présenté les propriétés physiques des matériaux III-V, ainsi que les structures cristallines, les bandes d'énergies, et les hétérostructures.

L'utilisation des matériaux composés apporte de nombreux avantages en termes de propriétés des matériaux. En effet, le but de leur fabrication est de profiter des bonnes propriétés de chaque matériau afin d'en former un qui sera mieux adapté à certaines applications. La combinaison de deux matériaux ou plus, permet donc d'améliorer les propriétés d'un matériau, est cela a fait l'objet de plusieurs études et l'intérêt de plusieurs chercheurs.

Dans ce chapitre on a présenté les propriétés physiques des matériaux III-V, ainsi que les structures cristallines, les bandes d'énergies, et les hétérostructures.