

Chapitre I

Les dispositifs optoélectroniques à DELs

La formidable progression des technologies optoélectroniques pour les applications de traitement de l'information (TI) et de l'éclairage public (EP) qui ont fortement investi le marché ces vingt dernières années, sont essentiellement dues aux capacités de transmission par fibre optique et aux performances atteintes par les composants. En effet, ces dernières ont commencé, depuis les années 90, par remplacer les réseaux de télécommunication câblés en cuivre limités à des débits de 100 Mbits/s en moyenne. Dans les années 2000 l'émergence des composants à base de GaN a progressivement permis le remplacement des technologies de l'éclairage traditionnel. Actuellement, les performances des technologies optoélectroniques pour les TI, atteignant déjà plus de 160 Gbits/s grâce aux technologies de multiplexage de longueur d'onde λ (WDM), ne cessent d'augmenter et ont supplanté les technologies des interconnexions électroniques. La forte bande passante disponible sur une fibre optique monomode et la maîtrise des procédés de fabrication des matériaux III-V entrent, à présent, en concurrence avec les technologies développées en électronique essentiellement sur silicium.

Dans le cas des technologies GaN, on atteint aujourd'hui des performances de l'ordre de 100 lumen par watt avec une durée de vie moyenne de 20000 heures

Cependant, la maîtrise des techniques de fabrication des systèmes optoélectroniques est plus délicate que pour les technologies microélectroniques pour deux raisons majeures :

- La fonction optique nécessite un alignement très précis entre la puce et le système à lentilles ainsi que des matériaux dont les propriétés optiques doivent rester constante dans le temps.
- Le coût de fabrication pour les technologies optiques est relativement élevé par rapport aux fabrications pour des systèmes électroniques, en particulier pour les systèmes intégrés. En effet, la structure de base d'une diode électroluminescente (DEL) peut comporter plus de 10 couches épitaxiées dépassant de très loin la complexité des transistors électroniques.

Une revue des principales applications optoélectroniques de l'émission en proche infrarouge (IR) à l'émission dans le visible est proposée dans ce premier chapitre.

Un état de l'art des technologies des composants et systèmes optoélectroniques précisant les propriétés physiques et les structures des composants ainsi que l'architecture des systèmes associés est également proposé.

1. Les technologies optoélectroniques

1.1. Les différents matériaux

a) Les composés III-V de base

Les matériaux III-V sont constitués des éléments des colonnes IIIb et Vb de la classification périodique des éléments. Ainsi, de nombreux composés binaires peuvent être réalisés.

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. Le tableau I-1 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 de maille a .

Composé III-V	E_g (eV)	m^*/m_0	μ (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	a (Å)
GaN	3,36	0,19	380	$a=3,189$; $c=5,185$
GaAs	1,42	0,067	8500	5,6533
GaP	2,26	0,82	110	5,4512
InP	1,35	0,077	4600	5,8686

Tableau I - 1 - Propriétés physiques de composés III-V

Des semi-conducteurs binaires comme l'arséniure de gallium (GaAs), nitrure de gallium (GaN), le phosphure d'indium (InP), le phosphure de gallium (GaP), mais également les alliages ternaires et quaternaires qui en découlent, présentent des propriétés très intéressantes pour les applications optoélectroniques. Ces matériaux ont la particularité d'être à gap direct et de favoriser les transitions électroniques pour l'émission de lumière.

b) Les composés ternaires et quaternaires

Il est possible d'associer un ou deux éléments de substitution dans une matrice principale III-V. On obtient alors des composés ternaires ($A_xB_{1-x}C$) ou quaternaires ($A_yB_xC_{1-x}D_{1-y}$). L'intérêt de cette technique réside dans la modification du gap du matériau, le changement d'indice optique et les marches de potentiel réalisés par la différence de gap. Deux applications principales peuvent être envisagées :

- La multitude de matériaux ternaires et quaternaires existants permet de créer une gamme de composants émettant à des longueurs d'onde variées. On peut d'ores et déjà souligner les deux types de composants étudiés dans ce livre : $Al_{0,3}Ga_{0,7}As/GaAs$ (872 nm) et $InGaN/GaN$ (465 nm).

- La superposition de plusieurs couches de matériaux différents permet de réaliser des zones de confinement énergétique pour les porteurs et les photons. En effet, pour les porteurs, on peut créer des puits de potentiel permettant de les isoler dans la zone du puits. Pour les photons, le changement de matériau se traduit par une différence d'indice optique et permet le confinement de ces derniers dans une zone de plus fort indice optique (guide, cavité...).

c) Domaine de longueur d'onde et propriétés optiques

La figure I-1 propose, de manière non exhaustive, la correspondance entre matériaux, longueur d'onde et applications. On remarque que deux grands domaines sont traités :

- Le domaine des télécommunications à fibre optique : ce domaine est principalement porté par des technologies à diodes lasers de longueur d'onde 980, 1310 et 1550 nm pour une très grande partie. Les matériaux utilisés sont de l'InP pour les grandes longueurs d'onde et GaAs pour le 980 nm. Ce domaine ne sera pas traité plus spécifiquement dans ce livre.
- Le domaine grand public : ce dernier comporte deux grandes applications : l'enregistrement de données à base de diodes lasers et l'éclairage public. D'autres applications comme les télécommandes des appareils électroniques ou l'auto-focus des appareils photos font partie de ce type d'application.

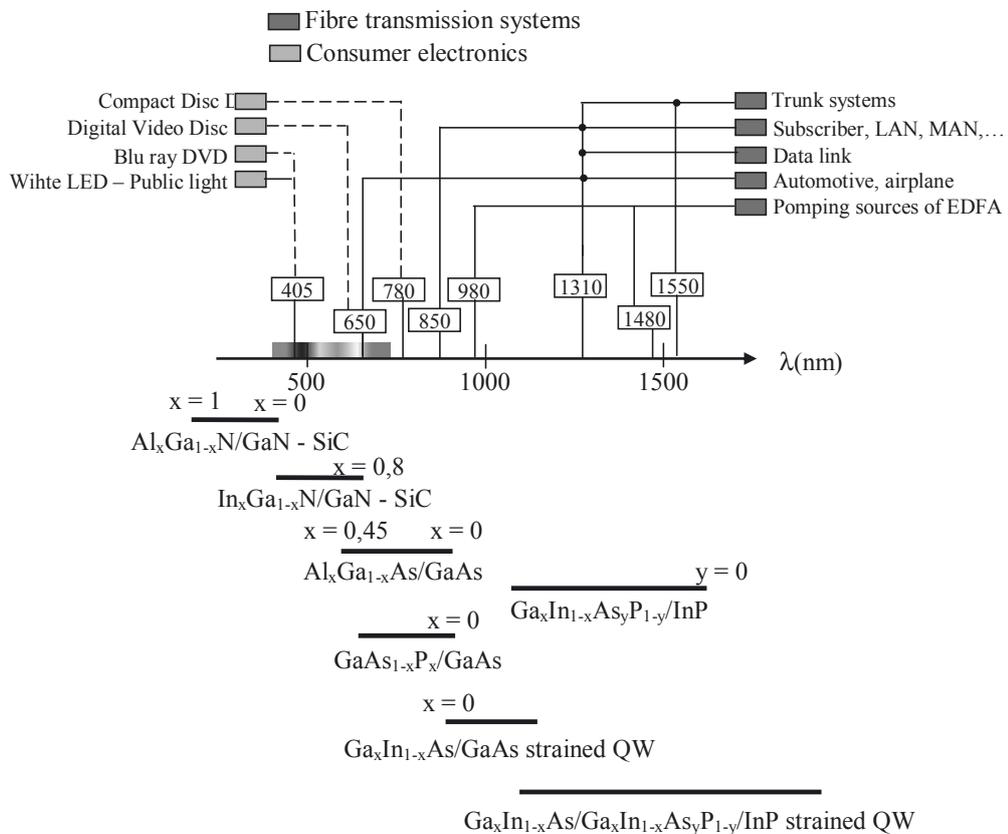


Figure I-1 - Les domaines de longueur d'onde associés aux applications

On remarque que l'ensemble des applications couvre le domaine des longueurs d'onde allant du visible au proche infrarouge (moins de 2000 nm). On se concentrera sur ce domaine et on remarquera que les différents matériaux exposés dans le tableau I-1 permettent de couvrir cette gamme de longueur d'onde en utilisant les composés ternaires et quaternaires.

La propriété essentielle des matériaux III-V permettant d'obtenir une émission de lumière est liée au fait que le gap est direct. Rappelons les différentes conditions permettant d'obtenir un photon à partir de transitions électroniques :

- On définit l'élément de la matrice $W_{n,k,n',k'}$ de la bande n , de vecteur d'onde \vec{k} optiquement excité sur une bande n' de vecteur d'onde \vec{k}' :

$$W_{n,k,n',k'} = -\frac{qE}{\Omega_i} I \delta(k' - k_{ex} - k) \quad (1.1)$$

E est le champ électrique, Ω_i est le volume considéré, k_{ex} est le vecteur d'onde de la lumière, δ est la fonction de Kröneckner et I est une intégrale dont le calcul est détaillé dans le chapitre 5. Le terme de la fonction de Kröneckner exprime la conservation des moments dans l'interaction électron-photon : $k' = k + k_{ex}$

Or le vecteur d'onde de l'électron et le vecteur d'onde du photon sont distincts : le vecteur d'onde de la zone de Brillouin est de l'ordre de $k = 2\pi/a = 10^8 \text{ cm}^{-1}$ (a est le paramètre de maille) alors que le vecteur d'onde optique peut être évalué à $k_{op} = 2\pi/\lambda \approx 10^4 - 10^6 \text{ cm}^{-1}$. Le vecteur d'onde de la lumière est donc négligeable devant celui des différentes bandes d'où : $k' = k$. Cette dernière relation impose transitions électroniques verticales.

- L'énergie des photons émis est voisine du gap du matériau :

$$\hbar\omega = E_c(k) - E_v(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_r} + E_g \quad (1.2)$$

On trouve alors que le matériau à gap direct est privilégié pour les émissions de lumière à partir de transitions électroniques. De plus, son gap est proche de la longueur d'onde d'émission.

La structure de bande des matériaux III-V comme le GaAs ou le GaN présente une largeur de bande interdite plus grande que celle du silicium et un gap à transmission directe. En effet, cet aspect comporte un intérêt particulier pour les composants optoélectroniques.

- le coefficient d'absorption des photons est élevé,
- le rendement de recombinaison radiative peut atteindre 100%,
- la durée de vie des porteurs minoritaires est relativement élevée.

L'émission de photons est donc rendue possible en favorisant les transitions à vecteur d'onde constant. Cette condition est réalisée dans la mesure où la bande de

valence est préférentiellement peuplée de trous et la bande de conduction d'électrons. La présence des deux types de porteurs est nécessaire pour obtenir une émission de photons. Pour une densité de porteurs faibles, l'émission spontanée est favorisée et lorsque la densité devient importante, l'émission stimulée devient prépondérante.

1.2. Les techniques d'élaboration

Les différentes techniques d'élaboration d'un composant optoélectronique se font principalement sous vide pour garder la surface à traiter exempt de défauts et de polluants. Le paramètre principal à retenir est la pression de l'enceinte dans laquelle on élabore le composant. Elle se mesure en pascal. Il existe plusieurs types de vide :

- Le vide primaire qui s'étend sur une plage allant de 10^{-3} à 10^{-6} Pa,
- Le vide secondaire dont la pression ultime est de 10^{-10} Pa,
- L'ultra vide dont les pressions débute à 10^{-10} Pa et sont, en moyenne, de l'ordre de 10^{-14} Pa en laboratoire.

Les différents vides sont principalement caractérisés par la pression mais sont utilisés en élaboration de composants pour la maîtrise de la pollution de la surface d'un semiconducteur (tableau I-2).

Pression (Pa)	Libre parcours moyen	Nbre de chocs ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Temps de formation d'une monocouche
1013	0,1 μm	$2,9 \cdot 10^{23}$	$3,4 \cdot 10^{-9}$ s
10^{-3}	10 cm	$2,9 \cdot 10^{17}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$ s
10^{-6}	100 m	$2,9 \cdot 10^{14}$	3,4 s
10^{-9}	100 km	$2,9 \cdot 10^{11}$	1 heure
10^{-12}	10^5 km	$2,9 \cdot 10^8$	40 jours

Tableau I - 2 - Caractéristiques physiques des différents types de vide

On remarque que pour éviter tout oxydation ou pollution d'un semiconducteur, il est préférable de travailler dans des vides relativement poussés : secondaire ou ultra vide. Une autre colonne est importante pour l'élaboration de composants optoélectroniques, c'est le libre parcours moyen des particules. Ce paramètre permet de donner une estimation de la distance à maintenir entre la source du matériau à ajouter sur le substrat et l'échantillon cible. Plus cette distance est grande, plus le dépôt ou la gravure sont précis et uniformes. Il sera nécessaire d'utiliser des techniques de masque par résine polymère afin de réaliser plusieurs composant sur un même substrat. Dans ce cas, le substrat complet se nomme le wafer.

a) Epitaxie

Il est nécessaire de maîtriser le dépôt de couches minces permettant de passer d'un matériau à un autre en préservant les propriétés physiques. La technique utilisée pour réaliser de telles performances est la technique d'épitaxie. Cette technique permet de déposer des couches minces, d'épaisseurs allant de 50 Å à 1000Å suivant le cas, d'un matériau différent ou identique au substrat en préservant les propriétés physiques et en particulier les propriétés semiconductrices (ordre cristallin).

L'amélioration constante des techniques d'épitaxie a permis d'obtenir des couches minces de plus en plus fines. Les techniques d'épitaxie par jets moléculaires (EJM ou MBE en anglais) et dépôts organométalliques en phase vapeur (MOCVD) sont à l'origine de l'essor de la fabrication des composants à double hétérostructure et à multipuits quantiques. En effet, il est possible de déposer le matériau semiconducteur de composition désirée couche atomique par couche atomique.

Le principal avantage de ces techniques est de pouvoir obtenir des couches minces ayant une épaisseur de quelques nanomètres utiles pour réaliser des puits quantiques. Avec certaines orientations de substrat (111 par exemple), il est possible de réaliser des boîtes quantiques. Ces éléments ont une restriction de dimension suivant trois axes. L'intérêt de tels systèmes est de réduire le courant de seuil dans les diodes lasers à des valeurs aussi faibles que 10 μ A.

La limite des techniques exposées ci-dessus est donnée par la différence des paramètres de maille de chaque couche. La figure I-2 représente les différents composés en fonction de leur paramètre de maille et les associations possibles avec une différence de paramètre de maille acceptable pour réaliser une épitaxie dans les meilleures conditions.

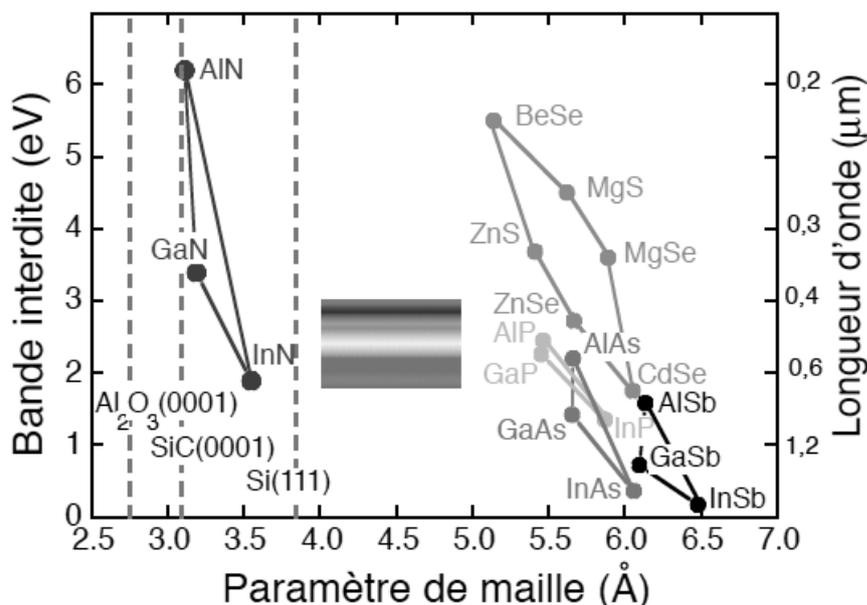


Figure I-2 - Représentation de la valeur de bande interdite en fonction du paramètre de maille

Les techniques d'épitaxies représentent un point essentiel dans le processus de fabrication des composants optoélectroniques. Les méthodes d'obtention de couches

minces ou de boîtes quantiques peuvent influencer les paramètres physiques des diodes électroluminescentes et des diodes lasers. Le paramètre principal qui s'est fortement amélioré est le rendement de luminescence. L'augmentation de ces performances a permis l'émergence des systèmes optoélectroniques émissifs. Actuellement, la maîtrise de la technique d'épitaxie par jet moléculaire (MBE) est à l'origine de la fabrication de puits quantiques et de boîtes quantiques qui constituent la zone active de la plupart des composants émissifs. Un exemple de bâti d'épitaxie à jet moléculaire est montré dans la figure I-3.

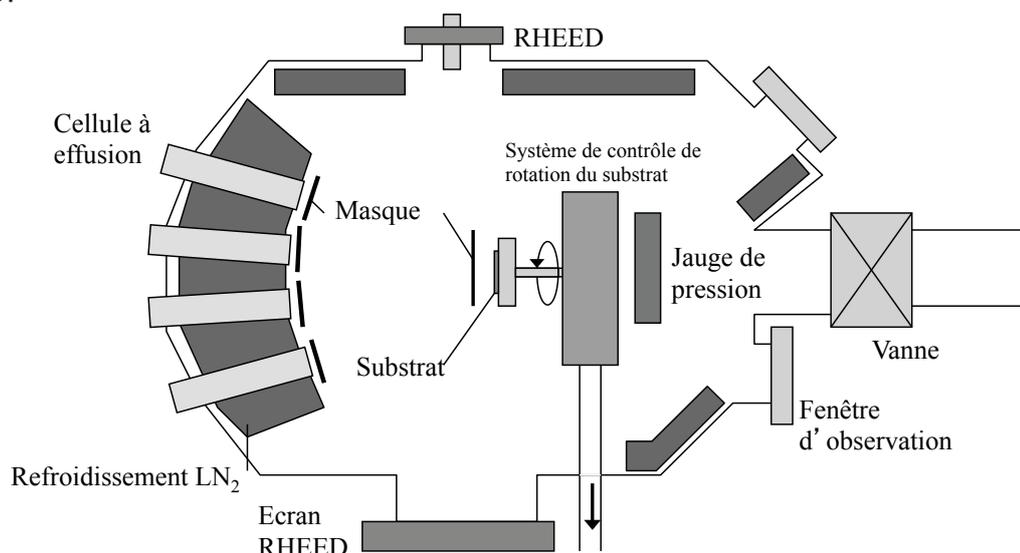


Figure I-3 - Schéma d'un bâti d'épitaxie à jet moléculaire

Les cellules à effusion sont des éléments qui contiennent les différents matériaux purs pour l'élaboration des couches. Dans la filière GaAs, on a du gallium, de l'arsénique, de l'aluminium, du silicium,... Le dosage de chaque matériau se fait en maîtrisant l'ouverture, la température et le débit de chaque cellule à effusion.

La limite des techniques d'épitaxie en couches minces de quelques dizaines de nanomètres est fixée par la différence des paramètres de maille de chaque couche (1 % environ). Dans le cas de couches ultra-minces ou puits quantiques, les niveaux de déformation peuvent être plus importants (1,5 à 2 %). Dans ce cas, les contraintes interfaciales entre les couches sont relativement importantes. Il existe donc une épaisseur dite critique telle qu'en dessous de cette épaisseur, il se construit des contraintes mécaniques de désadaptation de maille dans la structure. Au-delà de cette épaisseur critique telle que le désaccord de paramètre de maille est supérieur à 1 %, le film épitaxié peut se déchirer sous l'effet d'une contrainte supérieure à la contrainte de rupture de la couche. Tant que l'épaisseur du puits quantique est faible, l'énergie des contraintes reste élastique et donc inférieure à l'énergie des liaisons interatomiques au sein du puits. Les contraintes, induites par le désaccord de paramètre de maille, modifient essentiellement la forme des bandes valence du matériau. Ces modifications de bandes de valence engendrent un changement du comportement électro-optique de la zone active du composant.

Les structures actuelles à multi-puits quantiques sont telles que les couches

constituant la zone active sont contraintes avec un niveau de déformation supérieur à 1%. La densité de courant de seuil dépend de l'amplitude de la contrainte.

b) Les techniques de gravure

La gravure (etching) est un procédé utilisé en optoélectronique et consiste à retirer une ou plusieurs couches de matériaux à la surface d'un wafer. La gravure est une étape critique, extrêmement importante, lors de la fabrication d'éléments de microélectronique, chaque wafer pouvant subir de nombreuses étapes de gravure.

La majorité du temps, la couche protectrice est une résine photosensible qui a été déposée en utilisant des techniques de photolithographie.

Concrètement, après dépôt de la résine par enduction centrifuge (spin coating), la résine photosensible est exposée à travers un masque (qui représente le motif à graver sur le substrat - figure I-4 - étape 1) à un rayonnement lumineux (ultraviolet en général, qui permet de descendre dans les meilleurs cas à une échelle de 45 nm, rayon X pour descendre à une plus petite échelle). L'étape 2 consiste à effectuer une révélation de la résine afin d'enlever les parties exposées à la lumière (pour une résine négative). Il existe des résines positives dans lesquelles on enlève les parties non exposées à la lumière.

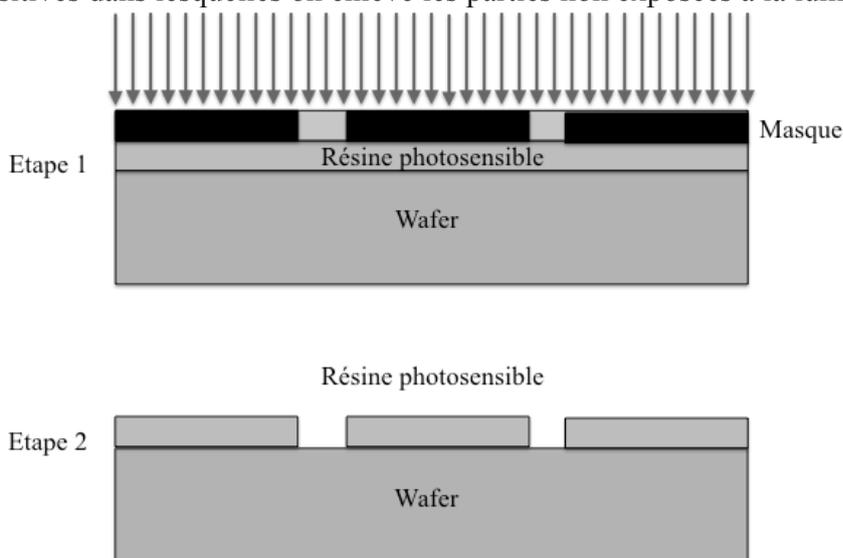


Figure I-4 - Procédé de lithographie

La principale technique de gravure chimique est la technique dite de "gravure chimique humide" (chemical wet etching). Le substrat en parti protégé est plongé dans une solution qui va attaquer chimiquement la surface du wafer non protégée. Il s'agit, en général, d'un acide : acide fluorhydrique pour un substrat en silicium (le seul capable de réagir avec la couche de dioxyde de silicium qui se forme naturellement à la surface du silicium), acide chlorhydrique pour un substrat en arséniure de gallium (l'ion chlorure réagit fortement avec le gallium) ou plus faible, tel que l'acide citrique.

Cette technique présente plusieurs avantages :

- Elle est relativement facile à mettre en œuvre, et peut être facilement industrialisée.