



Mémoire de fin d'étude

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE :(Licence)

Filière : physique

Option : physique de matériaux

THÈME :

Caractérisation et fabrication de transistor bipolaire de la classe III-V

Préparé par :

- Allouche Mohamed
- Boudrouaz Saadi

Soutenu le : 14/06/2014

Devant le jury :

Président: K. Mihoubi
Rapporteur: A.Bentabet
Cu-rapporteur : G.Regaioui
Examineur: A. Latreche

Université de BBA
Université de BBA
Université de BBA
Université de BBA

Année Universitaire 2013-2014



REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont tout premièrement à Dieu Tout Puissant, pour le Courage, la patience et la santé qu'il nous a accordées durant toutes ces années d'étude en particulier, et de vie en général, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de nos chemins

Ce travail est réalisé à l'université de Bordj Bou Arreridj institut des sciences et technique Département de SM.

Nous remercions :

*Monsieur le professeur **Abdelouahab Bentabet** et Monsieur **Regaigui Gasmí** qui nous fait l'honneur d'accepter d'encadrer ce Mémoire pour ses conseils, sa gentillesse son soutien, sa patience pendant la correction de la thèse. Son aide durant la réalisation de ce mémoire.*

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département de Physique pour leurs apports de connaissance durant mes années d'études

Nous remercions également tous les membres du jury d'avoir accepté de lire ce Manuscrit et d'évaluer ce modeste travail.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I :

Généralité sur la cristallographie

I.1) Les trois états physiques de la matière.....	2
I.1.1) L'état gazeux	2
I.1.2) L'état liquide.....	2
I.1.3) L'état solide.....	2
I.2) Les divers états solides.....	3
I.2.1) Solides amorphes ou vitreux.....	3
I.2.2) Solides cristallins.....	3
I.3) Classification des divers types de cristaux.....	3
I.3.1) Liaisons fortes.....	3
a) Cristaux métalliques.....	3
b) Cristaux ioniques.....	3
c) Cristaux covalents.....	3
I.3.2) Liaisons faible.....	4
a) Cristaux moléculaires.....	4
I.4) Réseaux périodique d'atomes.....	4
I.5) Bases de la cristallographie.....	4
I.5.1) Maille.....	4
I.5.2) Réseau.....	5
I.5.3) Motif.....	5
I.6) Réseau de bravais	6
I.6.1) Les sept systèmes cristallins.....	6
I.6.2) Les quatorze réseaux de Bravais.....	6
I.7) Énumération des sept systèmes cristallins et des quatorze réseaux de	7

Sommaire

Bravais.....	
I.7.1) Cubique (3).....	7
I.7.2) Tétragonal (2).....	7
I.7.3) Orthorhombique (4).....	8
I.7.4) Monoclinique (2).....	9
I.7.5) Triclinique (1).....	9
I.7.6) Trigonal (1).....	10
I.7.7) Hexagonal (1).....	10

Chapitre II :

Les semi-conducteurs

II.1) Les semi-conducteurs	
II.1.1) Le semi-conducteur intrinsèque.....	11
II.1.1.1) Introduction.....	11
II.1.1.2) Corps composés semi-conducteurs.....	12
II.1.2) Semi-conducteur extrinsèque.....	13
II.1.2.1) Semi-conducteur de type N.....	13
II.1.2.2) Semi-conducteur de type P.....	14
II.1.3) Conduction par électron et par trou.....	14
II.2) Bande interdite (gap).....	15
II.3) Semi-conducteur III-V.....	17
II.3.1) Structure cristalline.....	17
II.3.2) Structure électronique.....	18
II.3.3) L'alliage $Al_xGa_{1-x}As$.....	19
II.4) La jonction PN.....	19
II.5) La diode.....	22
II.5.1) Diode idéale.....	22
II.5.1.1) En polarisation directe.....	22
II.5.1.2) En polarisation inverse.....	22
II.5.2) Diode réelle à semi-conducteur.....	23

Chapitre III :

Propriété de transistor bipolaire

III) Le transistor	
III.1) Histoire du transistor.....	25
III.2) Classification des transistors	26
III.2.1) Les transistors unipolaires.....	26
III.2.2) Les transistors bipolaires	26
III.3) Caractéristiques des transistors bipolaires.....	27
III.3.1) Effet transistor.....	27
III.3.2) Modes de fonctionnement.....	31
III.3.2.1) Montage émetteur commun.....	31
III.3.2.2) Montage base commune.....	32
III.3.2.3) Montage collecteur commun.....	32
III.4) Fabrication de transistor bipolaire.....	33
III.4.1) Hétéro-structures.....	33
III.4.1) Hétéro-structures.....	33
III.4.1.2) Puits quantique.....	33
III.4.2) Fabrication des hétéro-structure.....	34
III.4.2.1) Les techniques de croissance épit axiale.....	35
a) Principe de l'épitaxie par jets moléculaires (MEB)	35
b) Chambre de croissance MBE	37
III.4.2.2) Le dépôt de phase vapeur à partir d'organométalliques (MOCVD).....	39
a) Les injecteurs.....	39
b) La source.....	40
c) La zone de dépôt.....	40
Conclusion générale	42
Références bibliographique.....	43
List de figure.....	45
Résumé.	

Introduction

générale

Introduction générale :

L'utilisation de **semi-conducteur** sous forme cristalline remonte au début du siècle dernier. Dans l'ensemble des matériaux, les semi-conducteurs constituent une classe bien définie, avec des propriétés physiques particulières qui sont sources d'intérêt au plan de la connaissance fondamentale et à celui des applications. Dans telles applications, les composés **semi-conducteurs III-V** sont préférables. On citera pour exemple quelques composés binaires et ternaires, GaAs, InSb, GaAlAs, InGaAs,... Les propriétés de ces matériaux sont très intéressantes pour les performances de ces dispositifs.

Principalement remarquables par leurs propriétés électroniques, les **semi-conducteurs** interviennent presque dans tous les équipements électriques. La plus grande partie des composants [**transistors (transistor bipolaire, transistor unipolaire), diodes**].

Le transistor bipolaire ; Depuis sa première réalisation en 1947 par J. Bardeen et W. H. Brattain et le développement théorique et physique de son fonctionnement par W.B. Shockley, Un transistor bipolaire dispose de trois connexions : l'émetteur, la base et le collecteur et ainsi de trois courants terminaux : le courant d'émetteur I_E , le courant de base I_B et le courant collecteur I_C .

En effet, il a fallu attendre les années 70 pour que se généralisent les technologies de croissance (MBE, MOCVD) offrant aux équipes de recherche. Les différentes moyennes de techniques de fabrication des hétéro-structures grâce aux techniques de croissance comme : l'épitaxie par jets moléculaires (MBE), et l'épitaxie vapeur aux organométalliques (MOCVD), permettent d'avoir de bon qualité à la révolution innovante.

Ce mémoire comprend trois chapitres

- Dans le premier chapitre, nous présenterons une généralité sur la cristallographie.
- Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les semi-conducteurs et le semi-conducteur III-V et la diode et la jonction PN.
- Dans le troisième chapitre, nous présenterons le transistor bipolaire et leurs caractérisations et fabrication à hétérojonction.
- En fin, une conclusion générale achève le présent mémoire.

Chapitre I: Généralité sur la crystallographie

I.1) Les trois états physiques de la matière :

I.1.1) L'état gazeux est l'état le plus désordonné:

Les molécules sont en agitation perpétuelle et les forces d'interactions restent très faibles en raison de la dispersion des molécules.

I.1.2) L'état liquide :

Est l'état le moins "connu" Les molécules (ou les ions) sont au contact mais disposées irrégulièrement; il existe des vides interstitiels (lacunes) de la taille des molécules, permettant à ces dernières de se déplacer de proche en proche. L'état liquide est un état fluide, malgré la valeur plus élevée des forces d'interactions moléculaires.

I.1.3) L'état solide :

Est un état compact et le plus souvent ordonné. Les entités (molécules, atomes ou ions) sont au contact, et rangées selon une périodicité tridimensionnelle. Même s'il existe des vides interstitiels, leurs dimensions restent inférieures à celles des entités du solide, ce qui leur enlève la propriété de fluidité et les rend pratiquement indéformables. Les forces d'interactions y sont importantes.

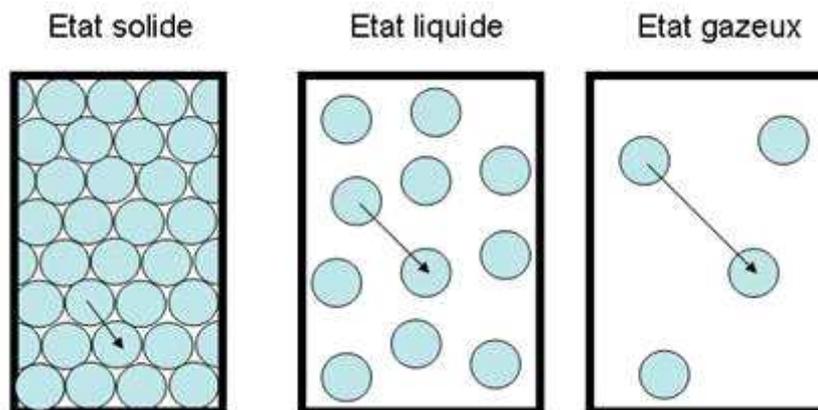


Figure (I.1) : Les trois états physiques de la matière[1].

Chapitre I : Généralité sur la cristallographie

I.2) Les divers états solides :

I.2.1) solides amorphes ou vitreux :

Désormais, il n'y a pas d'ordre mais une distribution au hasard. On parle parfois d'état liquide figé. On n'observe plus de température de fusion nette. Le passage du solide au liquide se fait par un ramollissement progressif et une diminution de la viscosité. L'état vitreux est un état métastable, comme par exemple la trempe brutale d'une coulée de lave. Désormais, on retrouve des propriétés isotropes comme pour les liquides.

I.2.2) solides cristallins:

Ils correspondent à un assemblage régulier sur de larges domaines à l'échelle microscopique (on parle de microcristaux de 10 nm et plus). Ils se caractérisent par une température de fusion nette (palier de changement d'état sous pression fixée). Ils ont en outre des propriétés anisotropes liées à leur structure (par exemple conduction électrique ou facilité de clivage dans une direction bien précise).

I.3) Classification des divers types de cristaux :

On classe en général les cristaux d'après la nature de la liaison chimique assurant leur cohésion:

I.3.1) Liaisons fortes:

a) Cristaux métalliques: les entités sont des atomes métalliques et la liaison est dite liaison métallique.

Exemples : Na(s), Fe(s).

b) Cristaux ioniques: les entités sont des ions et la liaison est dite liaison ionique.

Exemples : NaCl(s), CaF₂(s).

c) Cristaux covalents : les entités sont des atomes non métalliques et la liaison est de nature covalente. Exemples : C(s), Si(s).

Chapitre I : Généralité sur la cristallographie

I.3.2) Liaisons faibles :

a) **Cristaux moléculaires:** les entités sont des molécules et la cohésion est assurée par forces de Vander Waals ou liaisons hydrogène. **Exemples :** I₂ (s), H₂O(s) [1].

I.4) Réseaux périodique d'atomes :

Un cristal idéal peut être construit par une répétition régulière, dans tout l'espace, d'unités structurales identiques. Dans les cristaux les plus simples connue le cuivre, l'argent, le fer, l'aluminium et les alcalins, l'unité structurale contient un seul atome. Mais la plus petite unité structurale d'un cristal peut également être constituée d'un grand nombre d'atomes ou de molécules.

On décrit la structure de tous les cristaux par un réseau périodique ; à chaque nœud de réseau est attaché un groupe d'atomes. Ce groupe est appelé la base ; elle est répétée dans l'espace pour former le cristal.

I.5) Bases de la cristallographie:

I.5.1) Maille:

L'arrangement triplement périodique d'un cristal suggère de rapporter la description de celui-ci à un système d'axes O, x, y, z ayant pour origine O l'un des éléments du cristal, les axes pointant dans certaines directions imposées par la géométrie du cristal.

On peut alors considérer que le cristal peut être décrit par translation suivant les trois directions de référence, de la plus petite partie de celui-ci qu'on appelle la maille.

Autrement dit la maille est l'unité de base à partir de laquelle on peut engendrer tout le cristal en faisant subir à celle-ci différentes translations suivant les directions des trois axes cristallins (Ox, Oy et Oz).

Cette maille est en général un parallélépipède dont les sommets A, B, C sont respectivement sur les axes Ox, Oy, Oz, l'origine elle-même étant en général une entité de la structure cristalline (comme les sommets).

Pour décrire ce parallélépipède, il faut six paramètres géométriques :

Chapitre I : Généralité sur la cristallographie

- Trois longueurs : $OA = a$, $OB = b$ et $OC = c$.

- Trois angles : α, β, γ avec: $\alpha = (\overrightarrow{OB}, \overrightarrow{OC})$; $\beta = (\overrightarrow{OA}, \overrightarrow{OC})$; $\gamma = (\overrightarrow{OA}, \overrightarrow{OB})$ [1].

I.5.2) Réseau:

On peut simplifier la description de la maille cristalline en remplaçant les différentes entités par des points appelés nœuds.

On appelle réseau cristallin l'arrangement tridimensionnel des nœuds. Supposons que l'on veuille décrire la structure du calcaire, CaCO_3 , constitué par des ions Ca^{2+} et CO_3 .

Si Ca^{+2} est ponctuel, il n'en est pas de même de l'ion CO_3^- (ion plan) : une première description consiste donc à remplacer ces ions par des points appelés nœuds, dont la répartition spatiale constitue le réseau cristallin.

I.5.3) Motif :

Une fois connu le réseau cristallin, il suffit de déterminer le contenu d'une seule maille en remplaçant les différents nœuds par les vraies entités qui constituent le motif de la maille.

Le motif est donc la plus petite entité discernable qui se répète périodiquement par translation. Pour un cristal de sodium, le motif est un atome de sodium, tandis que pour un cristal de carbonate de calcium, le motif correspond à un ion Ca^{2+} et un ion CO_3 pour résumé, on peut écrire :

Structure cristalline = réseau cristallin + motif [1].

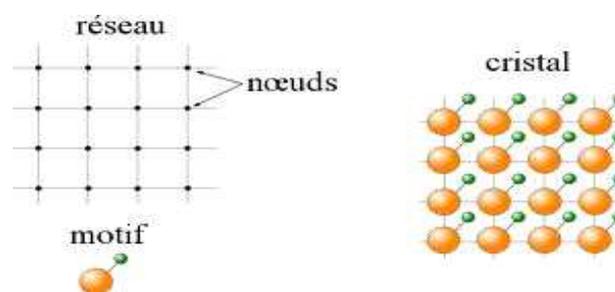


Figure (I.2) : Structure cristalline.

Chapitre I : Généralité sur la cristallographie

I.6) Réseau de bravais :

I.6.1) Les sept systèmes cristallins :

En examinant les symétries qui ne sont pas des translations, on considère souvent non pas le groupe d'espace entier du réseau de Bravais, mais seulement les opérations qui laissent un point particulier invariant (c'est-à-dire, les opérations de la catégorie ci-dessus). Ce sous ensemble du groupe de symétrie complet du réseau de Bravais est appelé groupe ponctuel du réseau de Bravais.

On dénombre sept groupes ponctuels distincts pour un réseau de Bravais. Toute structure cristalline appartient à un des sept systèmes cristallins, selon le type du groupe ponctuel du réseau de Bravais sous-jacent. Les sept systèmes cristallins sont énumérés dans la section suivante.

I.6.2) Les quatorze réseaux de Bravais :

Lorsqu'on ne se restreint plus aux opérations ponctuelles, mais que l'on considère le groupe de symétrie complet du réseau de Bravais, on recense quatorze groupes d'espace distincts''. Ainsi, du point de vue de la symétrie, il existe quatorze types différents de réseaux de Bravais. Cette énumération a été faite pour la première fois par M. L. Frarikenheim (1842). Celui-ci fit cependant une erreur de comptage, avançant quinze possibilités. A. Bravais (1845) fut le premier à compter ces catégories correctement.

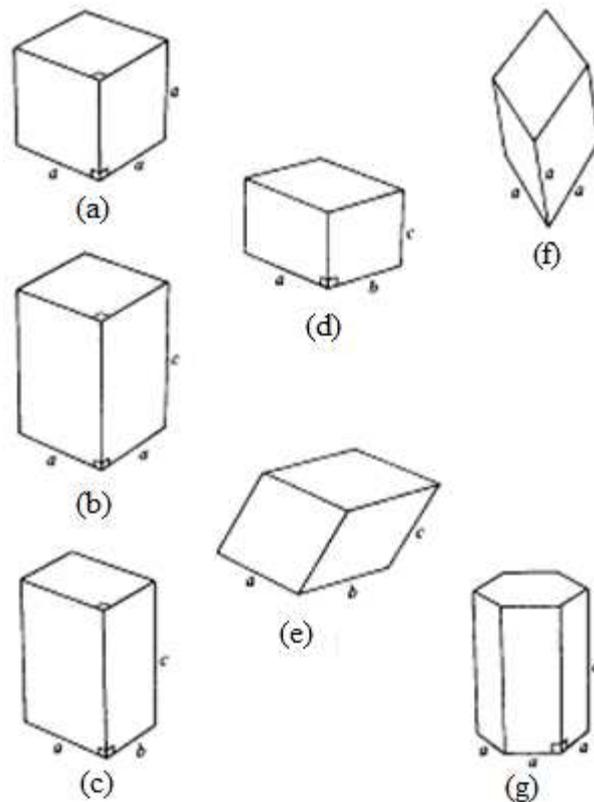


Figure (I.3) : Objets dont les symétries sont celles des groupes ponctuels des réseaux de Bravais appartenant aux sept systèmes cristallins : **(a)** cubique ; **(b)** tétragonal ; **(c)** orthorhombique ; **(d)** monoclinique ; **(e)** triclinique ; **(f)** trigonal ; **(g)** hexagonal[2].

I.7) Énumération des sept systèmes cristallins et des quatorze réseaux de Bravais :

Nous dressons ci-dessous la liste des sept systèmes cristallins et des réseaux de Bravais appartenant à chacun d'eux. Le nombre de réseaux de Bravais dans un système est indiqué entre parenthèses après le nom de ce système.

I.7.1) Cubique (3) :

Le système cubique contient les réseaux de Bravais dont le groupe ponctuel est simplement le groupe de symétrie d'un cube (**figure I.3a**). Trois réseaux de Bravais avec des groupes d'espaces complets différents possèdent le même groupe ponctuel cubique : le cubique simple, le cubique centré et le cubique à faces centrées.

I.7.2) Tétragonal (2) :

Chapitre I : Généralité sur la cristallographie

On peut réduire la symétrie d'un cube en tirant sur deux faces opposées pour le déformer en un prisme rectangulaire de base carrée, donc avec une hauteur qui n'est plus égale à l'arête du carré (**figure I.3b**). Le groupe de symétrie d'un tel objet est le groupe tétragonal. En étirant ainsi le réseau de Bravais cubique simple, on construit le réseau de Bravais tétragonal simple qui peut être caractérisé par un réseau de Bravais engendré par trois vecteurs primitifs perpendiculaires entre eux, deux étant d'égales longueurs. Le troisième axe est appelé axe c . En étirant de manière similaire les réseaux cubiques centrés et à faces centrées, on construit un seul autre réseau de Bravais, le tétragonal centré.

I.7.3) Orthorhombique (4) :

En continuant les déformations de manière à diminuer les symétries du cube, on peut réduire la symétrie tétragonale en déformant les faces carrées de l'objet de la (**figure I.4b**) en rectangles, produisant un objet dont les côtés sont perpendiculaires entre eux et de longueurs toutes les trois différentes (**figure I.4c**). Le groupe orthorhombique est le groupe de symétrie d'un tel objet. En étirant un réseau tétragonal simple le long de l'un des axes (**figures I.4a et b**), on produit le réseau de Bravais orthorhombique simple. Cependant, en étirant le réseau tétragonal simple le long d'une diagonale de carré (**figure I.4c et d**), on produit un second réseau de Bravais dont les symétries correspondent au groupe ponctuel orthorhombique, le réseau orthorhombique à bases centrées. De la même manière, on peut réduire la symétrie ponctuelle du réseau tétragonal centré de deux façons, en étirant soit selon un ensemble de droites.

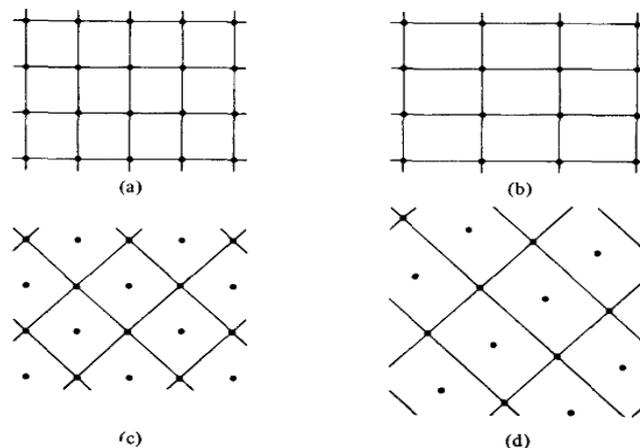


Figure (I.4) : projection le réseau Orthorhombique.

I.7.4) Monoclinique (2) :

On peut réduire la symétrie orthorhombique en déformant les faces rectangulaires perpendiculaires à l'axe c de la (**figure I.3d**) en parallélogrammes quelconques. Le groupe de symétrie de l'objet résultant (**figure I.3c**) est le groupe monoclinique. En déformant ainsi le réseau de Bravais orthorhombique simple, on produit le réseau de Bravais monoclinique simple qui n'a aucune autre symétrie que celle requise par le fait qu'il peut être engendré par trois vecteurs primitifs, l'un d'entre eux étant perpendiculaire au plan des deux autres. De manière similaire, en déformant le réseau de Bravais orthorhombique à bases centrées, on obtient un réseau avec le même groupe d'espace monoclinique simple. Par ailleurs, en déformant les réseaux de Bravais orthorhombiques centrés ou à faces centrées, on obtient le réseau de Bravais monoclinique centré (**figure I.5**).

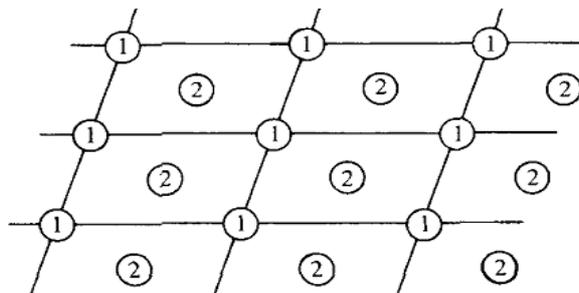


Figure (I.5) : Vue suivant l'axe c d'un réseau de Bravais monoclinique centré. Les points marqués 1 sont situés sur un plan perpendiculaire à l'axe c . Les points marqués 2 sont situés sur un plan parallèle à ce dernier distant de $c/2$ et sont directement au-dessus des centres des parallélogrammes formés par les points 1.

I.7.5) Triclinique (1) :

La destruction du cube est complète si l'on incline l'axe c de la (**figure I.3d**) de telle sorte qu'il ne soit plus perpendiculaire aux deux autres, produisant, ainsi l'objet dessiné sur la (**figure I.3e**), sur lequel n'existe plus aucune restriction, excepté le fait que les paires de faces opposées soient parallèles. En déformant ainsi le réseau de Bravais monoclinique, on construit le réseau de Bravais triclinique. Ce réseau est engendré par trois vecteurs primitifs n'ayant aucun rapport particulier entre eux, et qui constitue donc le réseau de Bravais de symétrie minimale. Le groupe ponctuel triclinique n'est pas, cependant, le groupe d'un objet sans aucune symétrie, puisque tout

Chapitre I : Généralité sur la cristallographie

réseau de Bravais est invariant sous une inversion par rapport à un point du réseau. C'est, cependant, la seule symétrie requise par la définition générale d'un réseau de Bravais, et donc la seule opération" du groupe ponctuel triclinique. En torturant ainsi un cube, nous sommes arrivés à générer douze des quatorze réseaux de Bravais et à cinq des sept systèmes cristallins. Nous pouvons trouver le treizième réseau et le sixième système en retournant au le cube original et en le déformant différemment.

I.7.6) Trigonal (1) :

Le groupe ponctuel trigonal décrit la symétrie d'un objet produit en étirant un cube le long de sa diagonale principale (**figure I.3f**). Le réseau fabriqué en déformant ainsi l'un quelconque des trois réseaux de Bravais cubiques est le réseau de Bravais trigonal. Il est engendré par trois vecteurs primitifs d'égales longueurs faisant des angles égaux entre eux.

I.7.7) Hexagonal (1) :

Le groupe ponctuel hexagonal est le groupe de symétrie d'un prisme droit à base hexagonale régulière (**figure I.3g**). Le réseau de Bravais hexagonal simple possède un groupe ponctuel hexagonal et est le seul réseau de Bravais du système hexagonal.

Les sept systèmes cristallins et les quatorze réseaux de Bravais décrits ci-dessus épuisent toutes les possibilités, ce qui est loin d'être évident (sinon les réseaux auraient porté le nom de Frankenheim). Cependant, il importe peu de comprendre les raisons pour lesquelles ce sont les seuls cas distincts ; Il suffit de savoir pourquoi ces catégories existent, et ce qu'elles représentent[2].

Chapitre II: les semiconducteurs

Chapitre II : les semi-conducteurs

II.1) LES SEMI-CONDUCTEURS :

Un **semi-conducteur** est intermédiaire entre un métal et isolant, il comporte comme un isolant mais il conduit l'électricité tend que la température augmente. Sa conductivité augmente avec la température contrairement aux métaux.

II.1.1) Le semi-conducteur intrinsèque :

II.1.1.1) Introduction :

Les corps simples **semi-conducteurs** sont obtenus dans le groupe IV de la classification périodique des éléments voir le (**tableau II.1**). Ce sont le germanium, et surtout le silicium.

Tableau (II.1): Classification périodique de Mendeleïev.

	III	IV	V	
	5 B (Bore)	6 C (Carbone)	7 N (Azote)	
	13 Al (Aluminium)	14 Si (Silicium)	15 P (Phosphore)	16 S (Soufre)
30 Zn (Zinc)	31 Ga (Gallium)	32 Ge (Germanium)	33 As (Arsenic)	34 Se (Sélénium)
48 Cd (Cadmium)	49 In (Indium)	50 Sn (Etain)	51 Sb (Antimoine)	

Les corps simples **semi-conducteurs** ont la caractéristique principale d'être tétravalent, c'est-à-dire que leur couche extérieure comporte 4 électrons. Ils cristallisent dans le système du carbone (diamant) qui est le système cubique présenté à la (**figure II.1**) Chaque atome est au centre d'un tétraèdre régulier dont les 4 sommets sont occupés par les atomes voisins les plus proches [3].

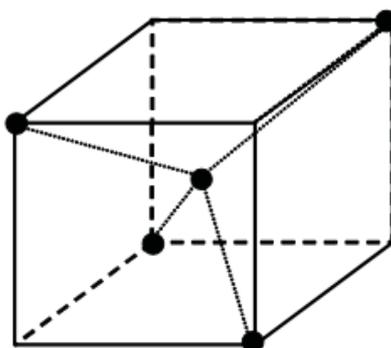


Figure (II.1) : maille élémentaire diamant

Chapitre II : les semi-conducteurs

Les liaisons entre atomes sont des liaisons de valence, très stables, chaque atome mettant un électron périphérique en commun avec chaque proche voisin. Leur couche périphérique se trouve ainsi complétée à huit électrons, ce qui est une configuration très stable.

Au zéro absolu, il n'y a pas d'agitation thermique et tous les électrons périphériques participent aux liaisons covalentes ; aucun n'est donc libre pour participer à la conduction électrique : le corps est isolant.

Lorsqu'on élève la température, l'agitation thermique permet à quelques électrons de se libérer de la liaison covalente, et d'être mobiles dans le cristal (**Figure I.2**).

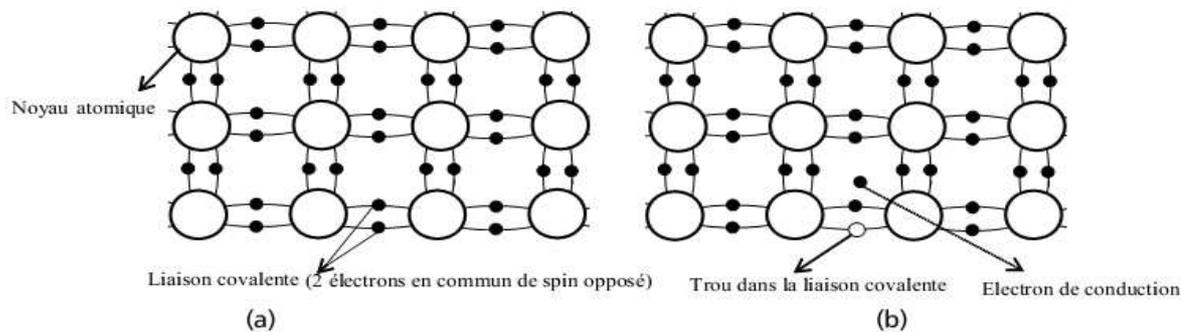


Figure (II.2) : Liaison de covalence en (a) et création d'un pair électron trou en (b) [3].

II.1.1.2) Corps composés semi-conducteurs :

Dans un cristal pur (semi-conducteur intrinsèque), le nombre de paires électron-trou créées dépend beaucoup de la température, ainsi que de la cohésion des liaisons covalentes (c'est-à-dire de la difficulté à arracher un électron au réseau cristallin) du corps considéré.

Dans, le diamant, à température ambiante, la quantité de paires électrons-trou créées est négligeable, et celui-ci est donc un isolant. Les seuls corps simples utilisés en tant que semi-conducteur sont donc le silicium et le germanium (ce dernier n'est pratiquement plus utilisé).

Mais on utilise actuellement de plus en plus de composés, le plus souvent des alliages binaires, de corps trivalents d'une part (**colonne III du tableau 1**), et pentavalents d'autre part (**colonne V**). L'Arséniure de Gallium (AsGa) prend ainsi

Chapitre II : les semi-conducteurs

une importance croissante dans les nouveaux dispositifs semi-conducteurs, principalement aux fréquences élevées.

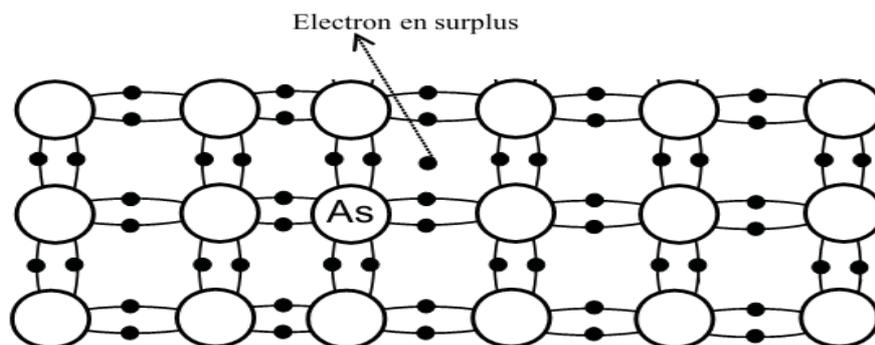
On peut citer encore, comme semi-conducteur composé le sulfure de Cadmium(CdS) utilisé dans les photorésistances, l'antimoniure d'indium (InSb). Le cristal formé possède les mêmes propriétés que les corps simples semi-conducteurs, les atomes trivalents et pentavalents étant en quantité identique (les couches externes des atomes sont donc complétées à 8 électrons) [3].

II.1.2) Semi-conducteur extrinsèque :

L'utilisation du semi-conducteur pur présente assez peu d'intérêt. L'utilisation de semi-conducteur dans la plupart des composants électroniques se fait dans un état dit dopé (semi-conducteur extrinsèque), par opposition avec le semi-conducteur pur, ou intrinsèque.

II.1.2.1) Semi-conducteur de type N :

Supposons par exemple que dans un **semi-conducteur** très pur, on introduise volontairement un corps pentavalent (métalloïde : phosphore, arsenic, antimoine) dans une proportion (taux de dopage) d'un atome d'impureté pour 10^5 à 10^8 atomes de semi-conducteurs. On a alors, dans le cristal, la situation schématisée en (**figure II.3**).



Figure(II.3) : Effet du dopage pour augmenter le nombre d'électrons libres.

L'électron en surplus n'entrant pas dans une liaison covalente n'est que faiblement lié à l'atome pentavalent. À la température ambiante, il est libre dans le **semi-conducteur** (à cause de l'agitation thermique) et participe à la conduction. Il en est pratiquement ainsi de tous les électrons en excès venant de l'impureté

Chapitre II : les semi-conducteurs

pentavalente. Le semi-conducteur extrinsèque ainsi constitué est dit de type N. L'impureté dans ce cas est appelée donneur.

II.1.2.2) Semi-conducteur de type P :

Introduisons maintenant dans le **semi-conducteur** intrinsèque, en faible quantité, un corps trivalent (par exemple Bore, Aluminium, Gallium ou Indium). Les atomes de Cette impureté vont se substituer, de place en place, à ceux du semi-conducteur.

Une lacune apparaît dans la liaison covalente, à l'endroit de chaque atome accepteur. À la température ambiante, cette lacune est comblée par un électron voisin sous l'effet de l'agitation thermique, formant un trou positif dans le cristal, libre de se déplacer à l'intérieur de celui-ci. On trouve donc, à température ambiante, pratiquement autant de trous libres que d'atomes accepteurs. Bien sûr, la neutralité du cristal est conservée globalement chaque atome accepteur étant ionisé négativement après capture d'un électron. Le semi-conducteur extrinsèque ainsi créé est dit de type P.

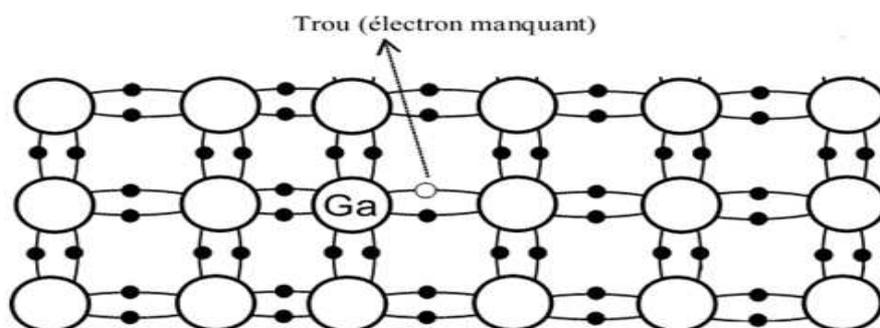


Figure (II.4) : effet du dopage pour augmenter le nombre des trous libres [3].

II.1.3) Conduction par électron et par trou :

Si une liaison de valence est brisée (agitation thermique, photon ...) l'électron devient mobile : il laisse un excès de charge positive le « trou » (symbolisé par un + dans un carré). Cette lacune va être comblée par un électron voisin libéré par agitation thermique et qui va à son tour laisser un trou : ceux-ci semblent se déplacer dans le réseau. Aux électrons (masse positive, charge négative) correspondent des trous (masse négative, charge positive).

Chapitre II : les semi-conducteurs

Le déplacement des trous étant un processus à deux étapes, leur mobilité dans le réseau est plus faible que celle des électrons.

Trous et électrons constituent les porteurs libres intrinsèques dont le nombre est fonction de la température. La neutralité électrique du matériau impose que les trous et les électrons soient en nombres identiques (n_i et p_i).

Pour le silicium pur à 300 K, on mesure : $n_i = p_i = 1,5 \cdot 10^{10} \cdot \text{cm}^{-3}$. Ce nombre est très faible si on le compare au nombre des atomes.

Toujours pour le silicium pur à 300 K, les mobilités sont :

$$\mu_n = 12 \cdot 10^6 \cdot \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1} \text{ et } \mu_p = 5 \cdot 10^6 \cdot \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}.$$

La conductivité intrinsèque du matériau $\sigma = e(n_i \cdot \mu_n + p_i \cdot \mu_p)$ est très faible.

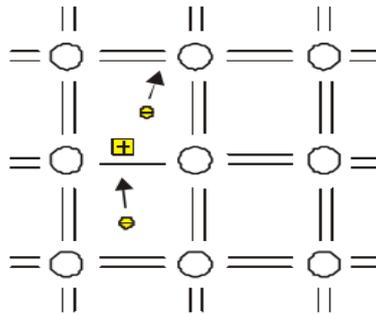


Figure (II.5) : Le déplacement des trous [3].

II.2) Bande interdite (gap) :

L'énergie de bande interdite est la mesure de la quantité d'énergie nécessaire à un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction lorsque celui-ci est soumis à une excitation.

Le matériau sera appelé semi-conducteur si le gap (notée E_g , unité: eV), ou la distance énergétique entre le bas de la bande de conduction et le sommet de la bande de valence, est inférieur à 2eV (**Figure II.2**). C'est le cas des matériaux Ge, Si, GaAs, InP, Si. Le matériau est considéré comme un semi-conducteur grand gap pour des valeurs supérieures à 2eV.

Chapitre II : les semi-conducteurs

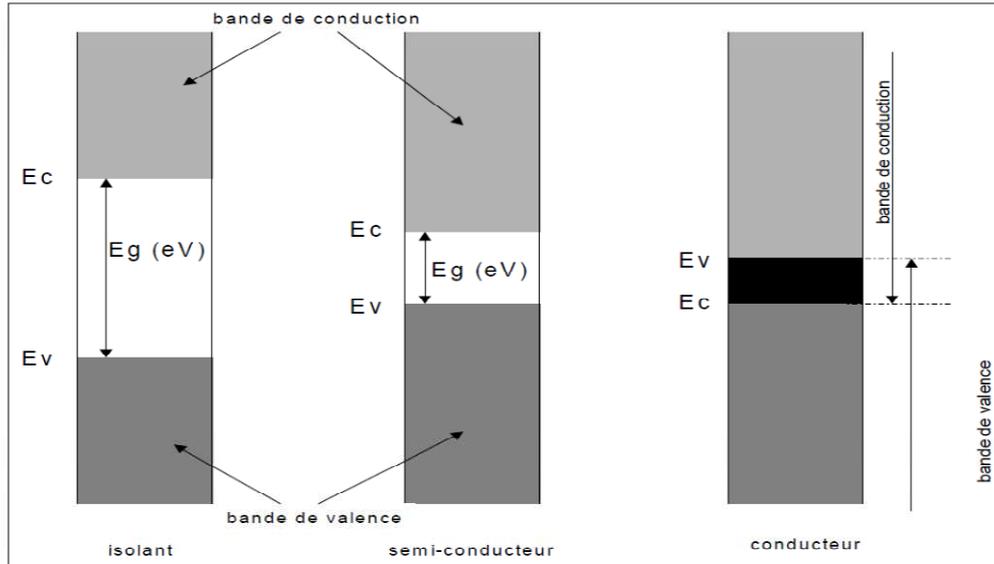


Figure (II.6) : diagrammes de bandes d'énergie des différents types d'éléments.

Le carbure de silicium (3.26eV), le nitrure de gallium (3.39eV), le nitrure d'aluminium (6.1eV) ainsi que diamant (5.45eV) ont des largeurs de gap supérieures à 2eV(**FigureII.6**), c'est pourquoi nous parlons de matériaux grand gap. Pour de très grandes valeurs de gap, on parle de matériaux isolants.

La taille de la bande interdite donne des caractéristiques électriques importantes à chaque semi-conducteur. En effet, la largeur de bande interdite fixe la limite en température au-dessous de laquelle le dispositif peut fonctionner sans détérioration, ainsi que l'aptitude du semi-conducteur à résister aux radiations.

La largeur de la bande interdite décroît avec la température (**Figure II.6**), et ces variations de la largeur de la bande interdite peuvent être décrites approximativement par la fonction suivante pour des températures supérieures à 300 K :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{(a-10^{-4}) * T^2}{T-b} \dots\dots\dots (II.1).$$

Les valeurs des paramètres *a* et *b* sont données dans le (**Tableau II.2**) pour différents matériaux [4].

Chapitre II : les semi-conducteurs

Tableau (II.2) : paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température [4].

Semi- conducteur	$E_g(0)$ (eV)	a (eV/K)	b (K)
AsGa	1.519	5.405	204
Si	1.17	4.73	636
Ge	0.7437	4.774	235
GaN	3.509	7.32	700
AlN	6.118	17.99	1432

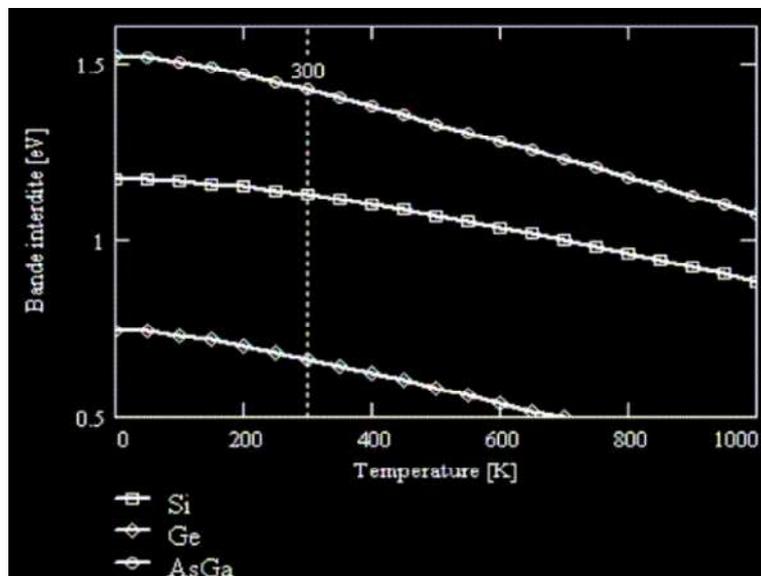


Figure (II.7): valeur de la bande interdite du Si, Ge, et AsGa en fonction de la température [4].

II.3) Semi-conducteur III-V :

II.3.1) Structure cristalline :

Les matériaux **III-V** sont constitués des éléments des colonnes **IIIb** et **Vbs** de la classification périodique des éléments. Ainsi, de nombreux composés binaires peuvent être réalisés. La plupart des matériaux **III-V** cristallisent dans la structure sphalérite dite "Zinc Blende" présentée sur (**Figure II.8**). Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant (C, Ge, Si, etc.), est constituée de deux sous-réseaux

Chapitre II : les semi-conducteurs

cubique face centrée (cfc), l'un d'éléments **III** et l'autre d'éléments **V**, décales l'un par rapport à l'autre d'un quart de la diagonale principale. Chaque atome se trouve donc au centre d'un tétraèdre régulier dont les sommets sont occupés par un autre atome de l'autre espèce [5].

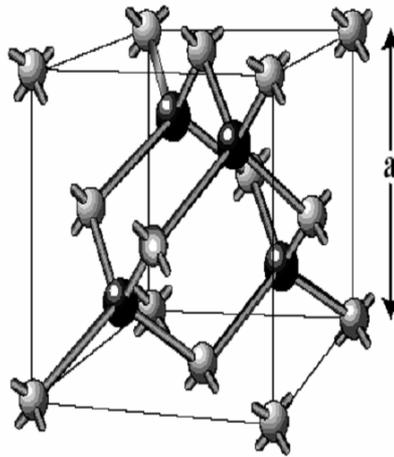


Figure (II.8) : Structure cristalline du GaAs, liaison tétraédrique de la structure Zinc-blende.

II.3.2) Structure électronique :

L'allure générale des bandes est la même pour tous les composés III-V, ils possèdent tous un gap direct, c'est-à-dire que le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande conduction sont situés au centre de la zone de Brillouin, en ($K=0$). Le minimum central de la bande de conduction correspond à des électrons de faible masse effective, donc très mobile. Il existe par ailleurs des minima secondaires en bordure de la zone de Brillouin qui sont beaucoup plus plats, les électrons ont une masse effective beaucoup plus grande, et donc faible mobilité [5].

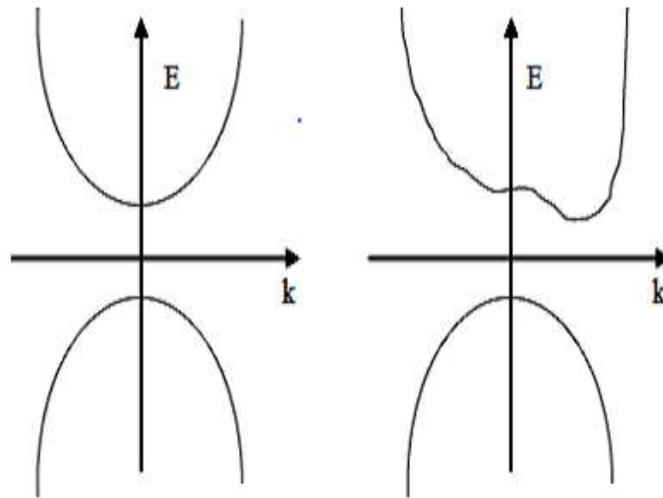


Figure (II.9) :Bandes interdites à transition directe et indirecte dans les semi-conducteurs. À gauche transition directe (cas du GaAs)[6].

II.3.3) L'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$:

L'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ est une solution solide de GaAs et de AlAs. Tout paramètre physique relatif à cet alliage peut être obtenu par combinaison des paramètres correspondants au GaAs et à l'AlAs. Les deux matériaux ont la même structure cristalline. Les paramètres physiques de ces deux matériaux sont voisins et se rejoignent pour une température de 900 °C environ. La nature de la transition énergétique de l'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ change selon le taux d'aluminium x , avec $0 < x < 1$. Pour une fraction d'aluminium inférieure à 0,45, la transition de l'alliage est identique à celle du GaAs caractérisé par une transition directe (le bas de la bande de conduction est la vallée Γ). Quand le taux d'aluminium devient supérieur à 0,45 la transition devient indirecte comme celle de l'AlAs (le bas de la bande de conduction se déplace vers la vallée X) [6].

II.4) La jonction PN :

La jonction **PN** est la base de la structure des diodes et des transistors, on sait qu'elle ne permet le passage du courant que dans un sens, cependant son fonctionnement n'est pas limité à cela et mérite une attention toute particulière.

Chapitre II : les semi-conducteurs

D'autre part, une compréhension qualitative des mécanismes mis en jeu dans une jonction **PN** suffit à dégager les principales caractéristiques et les principales contraintes directement applicables pour les composants de puissance.

Regardons ce qui se passe progressivement quand on forme une jonction **PN** :

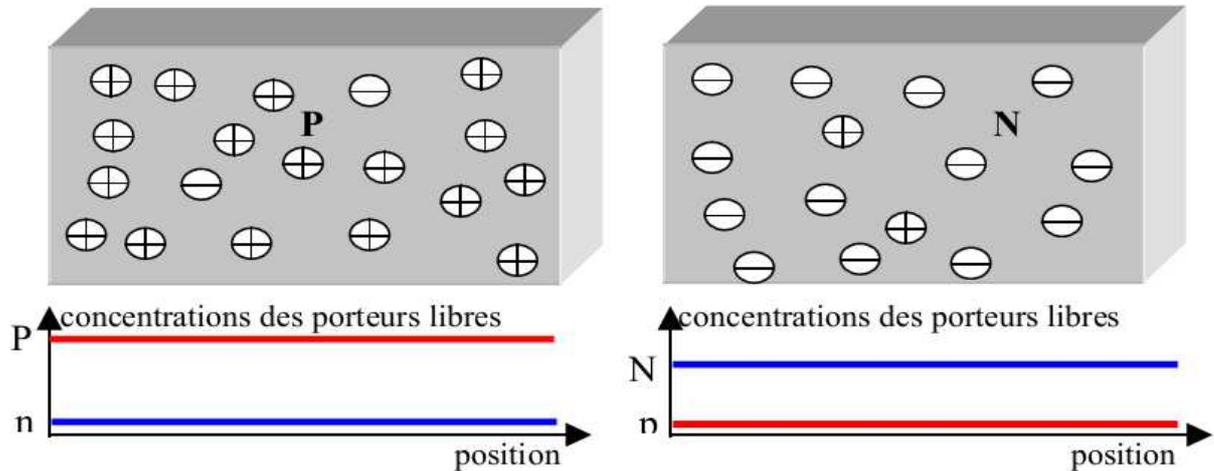


Figure (II.10) : pas de collage entre les substrats et sone courbe de concentration des porteurs libres [7].

1^{ère} Phase:

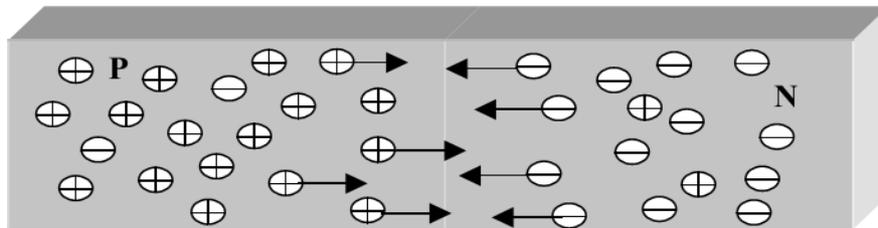


Figure (II.11) : collage des deux substrats.

Les porteurs libres de part et d'autre de la jonction vont se recombiner, puisque des électrons libres majoritaires sont mis en présence de trous libres majoritaires. Les charges se déplacent par diffusion naturelle.

2^{ème} Phase :



Figure (II.12) : formation de la zone de charge d'espace (ZCE).

La recombinaison massive autour de la jonction fait apparaître une zone électriquement neutre appelée Zone de Charge d'Espace (ZCE).

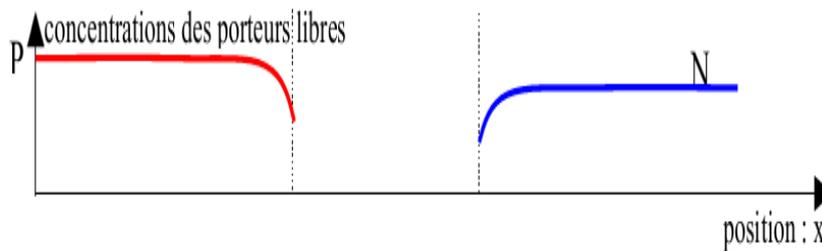


Figure (II.13) : concentration des porteurs libres.

3^{ème} Phase :

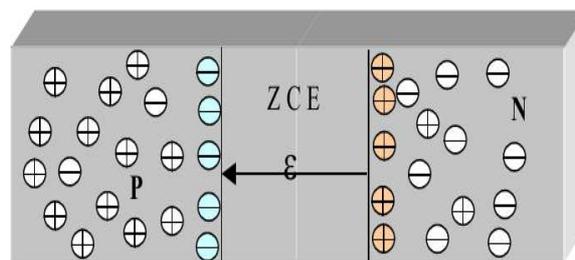


Figure (II.14) : Le champ électrique de la ZCE, jonction stabilisée.

Les charges fixes laissées par le départ des porteurs libres voisins de la ZCE provoquent une polarisation électrique de la ZCE, c'est à dire un champ électrique interne ϵ [7].

Chapitre II : les semi-conducteurs

A ce stade de l'évolution de la jonction, Le déplacement par diffusion des charges s'oppose à l'action du champ électrique ϵ .

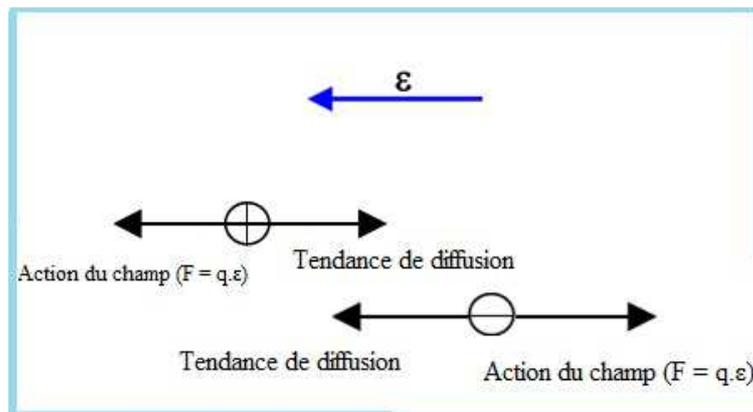


Figure (II.15) : Aux alentours de la ZCE [7].

L'équilibre de la jonction est atteint quand l'action du champ est rigoureusement égale à celle de la diffusion naturelle, c'est à dire quelle :

Courant de diffusion = le courant dit de saturation (celui créé par le champ).

Le champ interne de la jonction va donc à l'encontre de la circulation des porteurs et donc du courant électrique. Pour imposer un courant, il faudra vaincre le champ interne [7].

II.5) La diode :

II.5.1) Diode idéale :

C'est un dipôle électrique unidirectionnel dont les bornes sont l'anode (A) et la cathode (K).

II.5.1.1) En polarisation directe : c'est-à-dire si $U_A > U_K$ la résistance de la diode est nulle. Elle se comporte alors comme un interrupteur fermé.

II.5.1.2) En polarisation inverse : ($U_A < U_K$), on a : $R = \infty$. La diode est équivalente à un interrupteur ouvert. Une diode idéale ne dissipe donc aucune puissance [3].

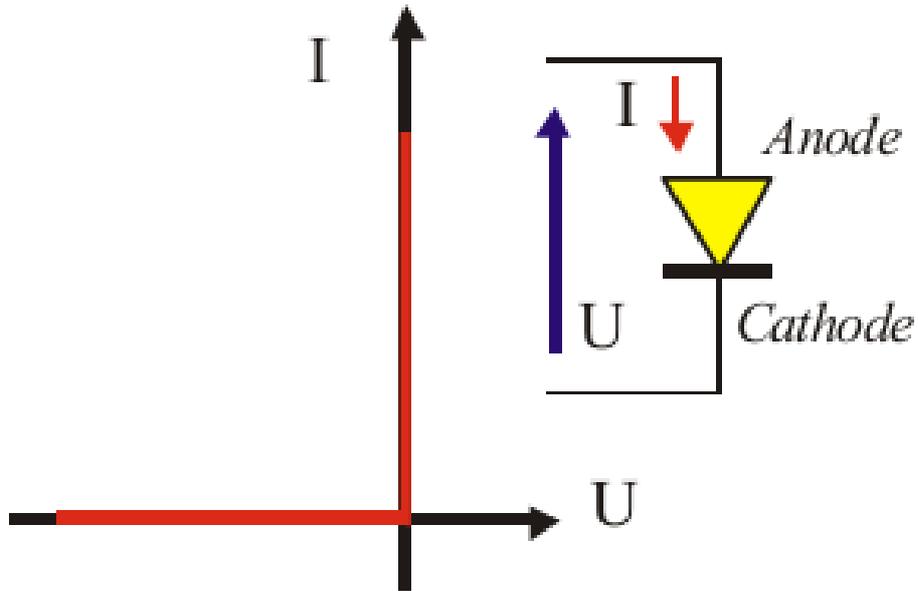


Figure (II.16) : diode idéale polarisé direct.

II.5.2) Diode réelle à semi-conducteur :

L'anode est la zone **P** d'une jonction **P N**. La zone de type **N** est la cathode. En polarisation inverse, le courant inverse est très faible mais il croît rapidement avec la température de la jonction.

En polarisation directe, au-delà de la tension de seuil ($V_S \gg 0,6 \text{ V}$ pour le silicium), la **diode** est conductrice. On peut définir en chaque point **P** de la caractéristique une résistance statique (trait bleu):

$$R_S = \frac{V}{I} \dots\dots\dots (II.1).$$

Et une résistance dynamique (trait vert) :

$$r_D = \frac{dV}{dX} \dots\dots\dots (II.2).$$

Au- delà de la tension de seuil, la résistance dynamique est sensiblement constante [3].

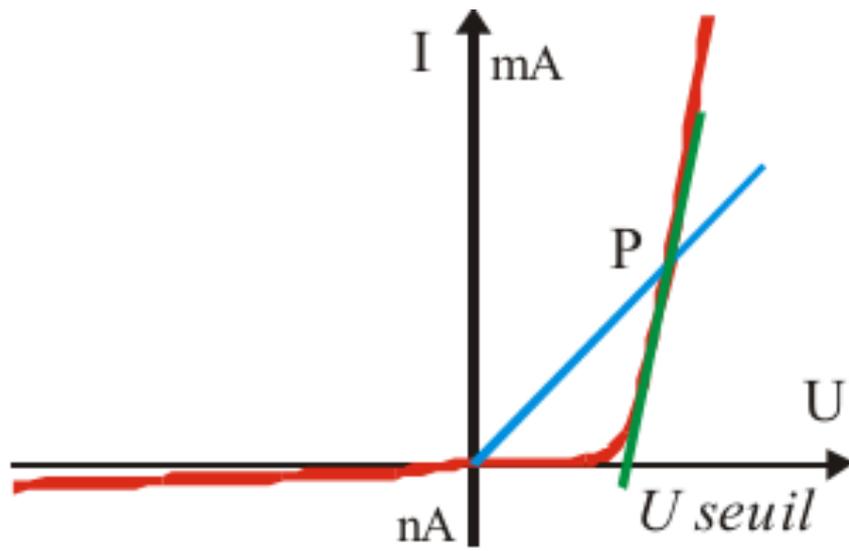


Figure (II.17) : diode real [3].

Chapitre III:

Propriétés de transistor
bipolaire

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

Propriétés de transistor bipolaire :

III.1) Histoire du transistor :

1947 : John BARDEEN et Walter BRATTAIN inventent le **transistor** à contact (**transistor**) au laboratoire de physique de la société BELL (USA). Cette découverte est annoncée en juillet 1948 (**figure III.1**).

1948 : Herbert MATARE et Heinrich WELKER inventent(indépendamment de BELL) aussi le **transistor** à contact en juin 1948 (en France). Ce **transistor** sera appelé le **Transistron** pour le distinguer de celui de BELL (**figure III.2**).

1948 : en janvier William SHOCKLEY invente le qw **transistor** à jonction bipolaire(**figure III.3**) mais la technique de fabrication ne sera maitrisée qu'en 1951 (**figure III.4**).

Les **transistors** remplacent les contacteurs électromécaniques des centraux téléphoniques et les tubes dans les calculateurs[8].



Figure (III.1):Transistron.



Figure (III.2) :Transistor contact.



Figure (III.3) :Transistor à jonction.

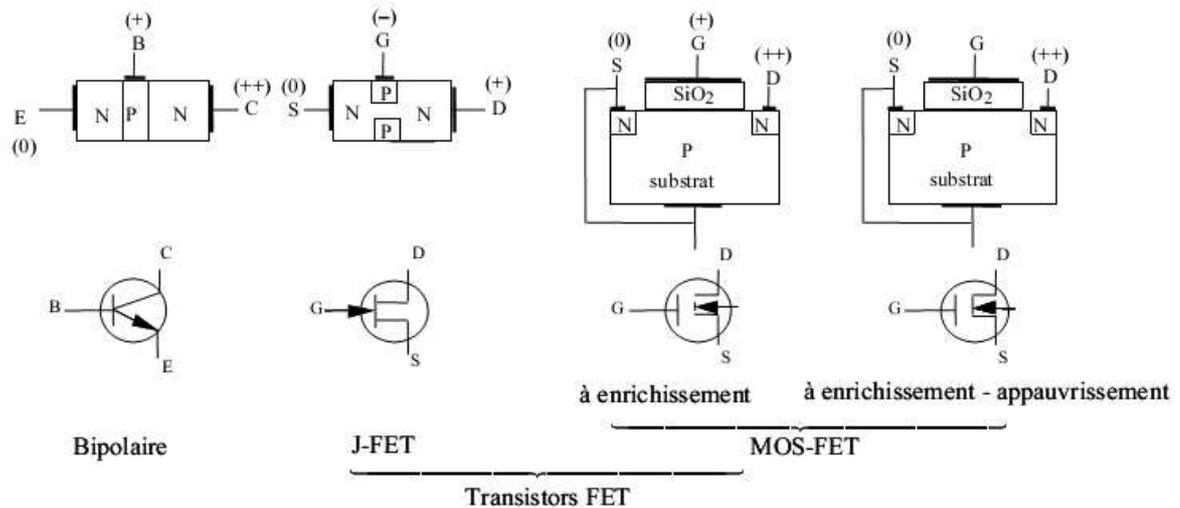


Figure (III.4): première Application Portative dutransistor.

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

III.2) Classification des transistors :

Les **transistors** sont réalisés par la jonction de différentes zones de semi-conducteurs de types **N** et de type **P**. Il existe deux grandes classes de transistors.



Figure(III.5) : Aperçu différents types de transistors[9].

III.2.1) Les transistors unipolaires :

Les **transistors unipolaires** dans lesquels un seul type de porteurs de charge est responsable du passage du courant. Ce sont les **transistors** à effet de champ ou **transistors F.E.T.** (Field Effect Transistors). Ces transistors se répartissent eux-mêmes en deux groupes : les JFET et les MOS.FET. Les MOS.FET se subdivisent encore en MOS.FET à enrichissement et MOS.FET à enrichissement-appauvrissement.

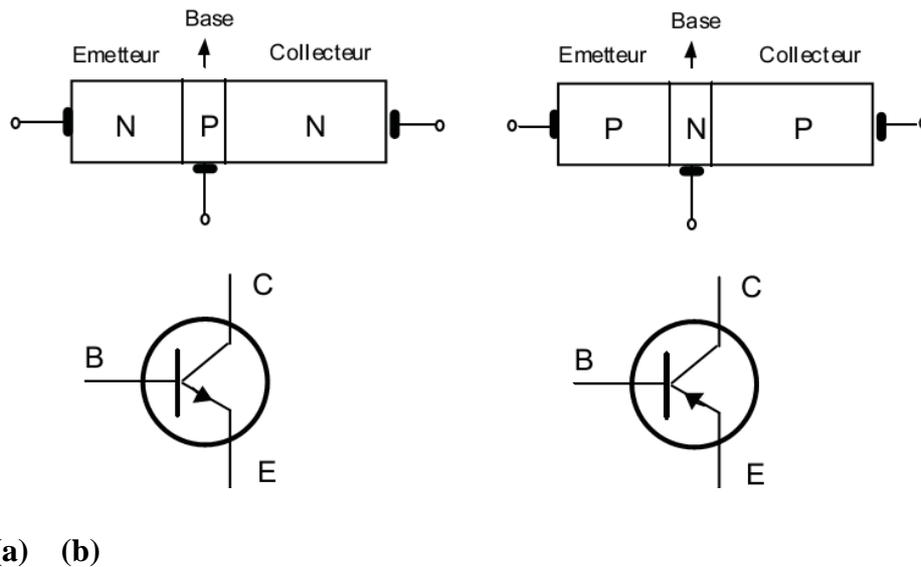
III.2.2) Les transistors bipolaires :

Un **transistorbipolaire** est constitué d'un monocristal de semi-conducteur (principalement le silicium) dopé pour obtenir deux jonctions, disposées en série et de sens opposé. Il existe donc deux types fondamentaux de **transistorbipolaires**, dits complémentaires:

Les**transistorsNPN** dans lesquels une mince couche de type **P** est comprise entre deux zones de type **N** : (**figure III.6.a**).

Les**transistorsPNP** dans lesquels une mince couche de type **N** est comprise entre deux zones de type **P** : (**figure III.6.b**).

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire



Figure(III.6) : (a)(b) Représentations schématiques et symboles des transistors bipolaires[9].

La couche intermédiaire est appelée base. Cette couche est très mince et est légèrement dopée. Les porteurs majoritaires sont donc en quantité assez faible.

- L'une des deux autres zones est appelée émetteur. Il s'agit de la zone la plus dopée du **transistor**. Son rôle consiste à injecter des porteurs (électrons dans le cas d'un **transistorNPN**) dans la base.

- La dernière zone qui est de même type que l'émetteur est appelée collecteur. Son dopage est plus faible que celui de l'émetteur et sa géométrie est différente. Le rôle principal du collecteur est de recueillir les porteurs.

Le **transistor** est donc un composant à trois bornes (tripôle) reliées respectivement à l'émetteur, à la base et au collecteur. Sa représentation schématique, ainsi que les symboles normalisés sont donnés à la(**figure III.6**) pour les deux types[9].

III.3) Caractéristiques des transistors bipolaires :

III.3.1) Effet transistor :

Un **transistorbipolaire** est constitué comme le montre la (**figure III.7**) de trois régions différemment dopées **PNP**ou **NPN**, d'un même monocristal semi-conducteur.

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

Il s'agit donc de deux jonctions PN tête-bêche présentant une région commune. Les trois régions portent respectivement les noms d'Emetteur, Base et Collecteur. C'est l'interaction étroite entre la jonction émetteur-base (E-B) et la jonction base-collecteur (B-C), favorisée par une faible épaisseur de base, qui est à l'origine de l'effet **transistor**.

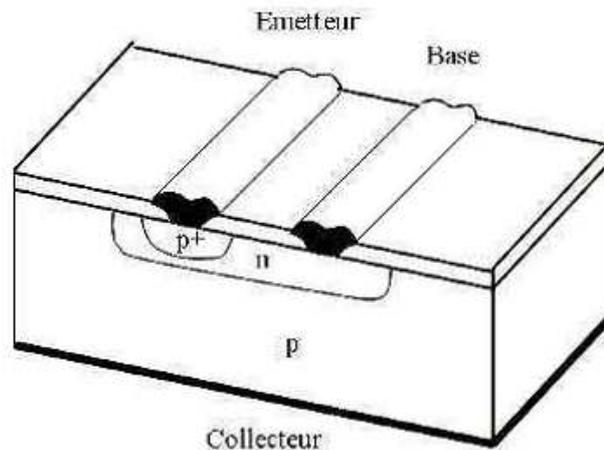


Figure (III.7): Transistor bipolaire [8].

Le courant inverse dans une jonction **PN** était proportionnel aux densités de porteurs minoritaires. Le principe de l'effet **transistor** consiste à moduler le courant inverse de la jonction base-collecteur polarisée en inverse, par une injection de porteurs minoritaires dans la base à partir de la jonction émetteur-base polarisée dans le sens direct. Une autre manière de comprendre le fonctionnement est de considérer les trous injectés dans la base à travers la jonction émetteur-base polarisée en direct. Ils sont ensuite soumis au champ intense de la jonction base collecteur polarisée en inverse et dérivent vers le collecteur.

Le bon fonctionnement du **transistor** nécessite que les porteurs minoritaires, injectés dans la base depuis l'émetteur, atteignent la jonction base-collecteur. Il est donc impératif que ces porteurs ne se recombinent pas à la traversée de la base, il faut par conséquent que l'épaisseur de la base soit très inférieure à la longueur de diffusion des porteurs minoritaires.

Ainsi, dans la mesure où la base est suffisamment étroite, une forte proportion du courant direct de la jonction émetteur-base constitue le courant inverse de la

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

jonction base-collecteur. A partir d'un signal d'entrée (E-B) constitué d'un fort courant (courant direct E-B) et d'une faible tension (tension directe E-B), on recueille donc à la sortie (C-B) un signal constitué d'un fort courant (courant inverse C-B \approx courant direct E-B) et d'une forte tension (tension inverse C-B). Le dispositif est par conséquent amplificateur de puissance, c'est un composant actif un raisonnement phénoménologique permet d'écrire simplement les équations qui régissent le fonctionnement du **transistor** à partir de l'équation caractéristique de la jonction PN.

Considérons la **Figure (III-8)** et superposons deux états d'équilibre caractérisés successivement par les jonctions C-B puis E-B, en court-circuit (a ; b et c) :

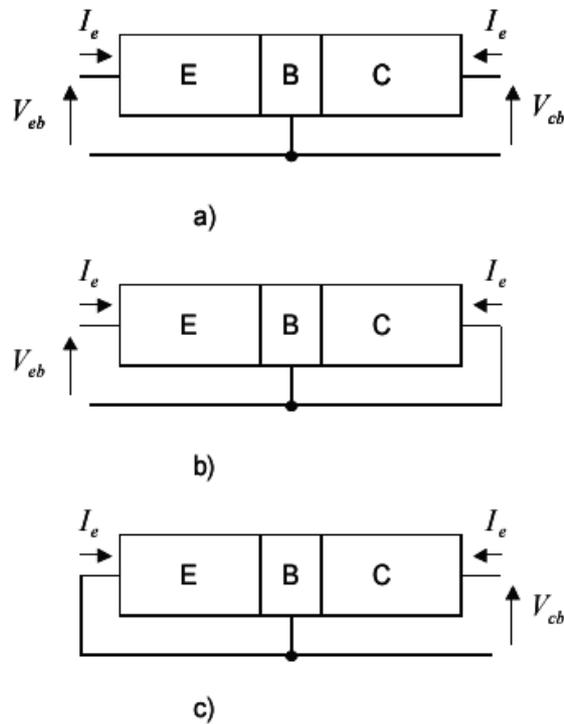


Figure (III.8) :Principe de superposition appliqué au bipolaire[8].

. $V_{eb} \neq 0, V_{cb} = 0$:

Le courant d'émetteur I_e est le courant d'une jonction PN, la jonction émetteur-base, Polarisée par une tension V_{eb} soit l'équation:

$$I_e = I_{SI} \left(e^{\frac{eV_{eb}}{KT}} - 1 \right) \dots \dots \dots (III.1).$$

Où I_{S1} est le courant de saturation de la jonction émetteur-base.

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

Le courant I_e se distribue entre l'électrode de base et l'électrode de collecteur. Si la base est très étroite et peu dopée, la plupart des porteurs minoritaires injectés dans la base atteignent la zone de charge d'espace de la jonction base-collecteur. Ils sont alors happés par le champ favorable qui règne dans cette zone, et constituent le courant collecteur I_c . Une faible proportion de ces porteurs se recombinent dans la base et créent un courant de recombinaison qui contribue au courant base I_b .

Le courant collecteur est donc une fraction importante du courant d'émetteur, compte tenu de la convention de signe portée sur la figure de **transistor bipolaire**, ce courant s'écrit:

$$I_c = \alpha I_{S1} \left(e^{\frac{eV_{eb}}{KT}} - 1 \right) \dots \dots \dots \text{(III.2).}$$

α représente le gain courant du **transistor** à tension collecteur-base nulle $V_{cb}=0$.

$V_{eb}=0, V_{cb} \neq 0$:

C'est le régime inverse du précédent, le fonctionnement de la structure est formellement semblable au précédent en inversant les indices e et c. Le courant I_c est le courant de la jonction collecteur-base polarisée par une tension V_{cb} :

$$I_e = I_{S2} \left(e^{\frac{eV_{eb}}{KT}} - 1 \right) \dots \dots \dots \text{(III.3).}$$

Où I_{S2} représente le courant de saturation de la jonction base-collecteur. Le courant collecteur I_c se distribue entre l'électrode d'émetteur et celle de base, si on appelle α_i la proportion de ce courant qui constitue le courant d'émetteur, ce dernier s'écrit:

$$I_e = -\alpha_i I_c = -\alpha I_{S1} \left(e^{\frac{eV_{eb}}{KT}} - 1 \right) \dots \dots \dots \text{(III.4).}$$

α_i représente le gain en courant inverse du **transistor** à tension émetteur-base nulle.

Il faut noter que pour des raisons de dissymétrie, à la fois dans le dopage et dans la géométrie, les coefficients α et α_i sont différents, $\alpha > \alpha_i$.

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

Si on superpose les deux états d'équilibre précédents, les courants I_e et I_c sont respectivement donnés par les sommes des expressions:

$$I_e = I_{S1} \left(e^{\frac{eV_{eb}}{KT}} - 1 \right) - \alpha_i I_{S2} \left(e^{\frac{eV_{eb}}{KT}} - 1 \right) \dots \dots \dots \text{(III.5)}$$

$$I_c = \alpha I_{S1} \left(e^{\frac{eV_{eb}}{KT}} - 1 \right) - I_{S2} \left(e^{\frac{eV_{eb}}{KT}} - 1 \right) \dots \dots \dots \text{(III.6)}$$

Ces équations de fonctionnement du transistor bipolaire portent le nom d'équations d'Ebers-Moll. Nous les avons déduites de raisonnements qualitatifs, nous allons les établir quantitativement.

III.3.2) Modes de fonctionnement

Les **transistors bipolaires** peuvent être utilisés selon trois types de montages : émetteur commun, base commune et collecteur commun, chacun adapté à un type d'application.

III.3.2.1) Montage émetteur commun :

Le montage le plus utilisé est le montage dit émetteur commun illustré ci-dessous :

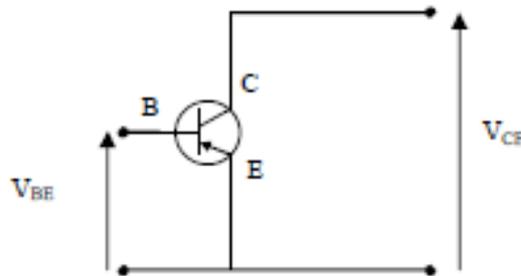


Figure (III.9) : Transistor PNP dans une configuration émettrice commune.

Dans ce montage, l'émetteur est à la masse, la base joue le rôle d'entrée et le collecteur représente la sortie du **transistor**. Le gain du **transistor** est alors défini comme le rapport entre le courant de sortie et de l'entrée, à savoir :

$$\beta = \frac{I_c}{I_B} \dots \dots \dots \text{(III.7)}$$

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

Ce montage permet d'utiliser le **transistor** comme un amplificateur de courant en exploitant l'effet **transistor**. Du fait de la forte valeur du gain, une faible variation de l'entrée : la base, engendre une forte variation de la sortie : le collecteur.

Il est particulièrement utilisé pour amplifier des signaux analogiques de faible amplitude, comme les signaux radio captés par une antenne [10].

III.3.2.2) Montage base commune :

Dans ce type de montage, la base du **transistor** est à la masse, l'émetteur fait office

d'entrée et le collecteur de sortie :

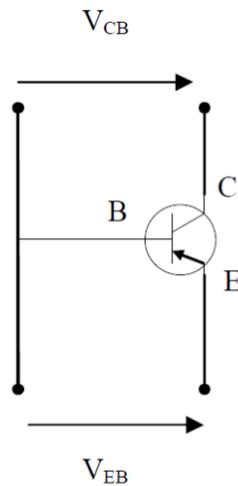


Figure (III.10) : Transistor PNP dans un montage base commune.

Le gain en courant s'exprime alors :

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \dots \dots \dots (III.8).$$

Montage collecteur commun :

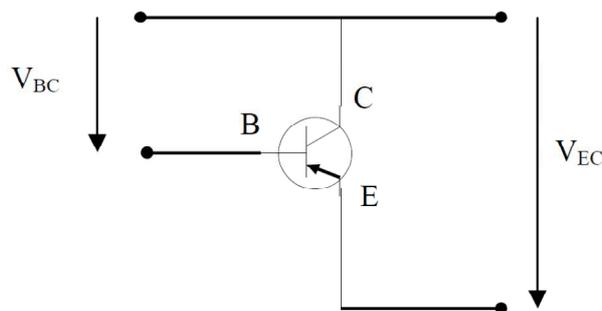


Figure (III.11) : Transistor PNP dans un montage collecteur commun.

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

Ce dernier montage utilise le collecteur comme référence, la base jouant le rôle d'entrée et l'émetteur de sortie. Ce type de montage est peu utilisé et peut servir comme étage de sortie dans certains amplificateurs.

III.4) fabrication de transistor :

III.4.1) Hétéro-structures :

III.4.1.1) Hétérojonction :

Une hétérojonction est une jonction entre deux semi-conducteurs dont le gap (la bande interdite) est différent. Les hétérojonctions ont une importance considérable en physique des semi-conducteurs et en optique.

Une hétérojonction est une jonction formée de deux semi-conducteurs différents ou d'un métal et un semi-conducteur. Quand les deux semi-conducteurs ont le même type de conductivité, on parle d'hétérojonction iso-type. Lorsque le type de conductivité diffère, on parle d'hétérojonction anis type. C'est ce dernier type d'hétérojonction qui présente davantage d'intérêt.

En 1951, William Shockley a proposé d'utiliser une hétérojonction abrupte comme injecteur base émetteur efficace dans un **transistor bipolaire**. La même année, Gubanov a publié un article théorique sur les hétérojonctions. Depuis, les hétérojonctions ont été largement étudiées, et de nombreuses applications (existant bien souvent avec des homo jonctions) ont pu être améliorées ou être opérationnelles à température ambiante. On citera notamment des diodes électroluminescentes, des lasers, des photo-détecteurs, des cellules, etc.[11].

III.4.1.2) Puits quantique :

En physique quantique, c'est un puits d'énergie de potentielle dans lequel une particule (électron, trou.) peut se retrouver en piège. La situation est comparable à celle d'une bille qui oscille au fond d'une cuvette de part et d'autre de son centre, mais ne peut pas en ressortir. Une particule piégée dans un tel puits est dite dans un état liée si son énergie est inférieure à la profondeur du puits. En revanche, si une particule possède une énergie supérieure à la profondeur du puits, elle le traversera sans y être capturée. On dit qu'elle est dans un état libre.

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

On caractérise un puits quantique par plusieurs paramètres, dont les deux principaux sont sa largeur (généralement inférieure à 300 angströms) et sa profondeur se mesure en électronvolts (inférieure à 4 eV). On commence à quantifier l'énergie quantique dès lors que ses dimensions sont suffisamment petites pour qu'apparaissent des effets propres dont seule la théorie quantique peut rendre compte:

En effet, en deçà d'une certaine dimension du puits, l'énergie d'une particule présente dans celui-ci possède la propriété d'être quantifiée. C'est-à-dire qu'elle ne peut prendre qu'un nombre bien défini de valeurs imposées par les caractéristiques de son puits. Selon la valeur d'énergie, on dit que la particule se situe sur un niveau quantique déterminé. Contrairement à l'exemple de la bille, une particule dans un état liée à la possibilité de s'échapper le puits par effet tunnel.

En réalité, dans tout système physique il existe des niveaux quantiques, mais si les dimensions du système sont suffisamment grandes (corps massif), les niveaux d'énergie permis sont se rapprochés de façon continue. Dans un noyau atomique, les nucléons restent « soudés ensemble », car ils se trouvent dans le puits quantique créé par ce noyau. Dans ce cas, la profondeur du puits est l'ordre de plusieurs mégaelectronvolts (MeV)[5].

Dans cette partie nous exposons en premier lieu à fabrication des hétéro-structures à partir de deux de croissance épit-axiale **MBE** et **MOCVD**.

III.4.2) Fabrication des hétéro-structure :

L'alignement de bande d'énergie dans les hétéro-structures est une propriété fondamentale. La structure des sous bandes est déterminée par les effets de l'interaction des porteurs de charges avec la discontinuité de l'hétérojonction qui met en évidence plusieurs propriétés électroniques. Par exemple dans le cas des **transistors bipolaires** à hétérojonction (HBT), la présence de tel alignement de bandes permet de les réaliser avec une base fortement épaisse. Le fort dopage de la base réduit sa résistance de même si elle est très étroite ; ce qui augmente la fiabilité de la composante. Les processus physiques qui se manifestent lorsqu'une hétéro-structure est placée dans un champ électrique et soumise à l'action d'un confinement quantique sont désignés sous le nom d'effet électro-quantique. Le champ électrique externe modifie ses propriétés électroniques. Les phénomènes électro-quantique d'une hétéro-structure dépendent de la taille, du profil de dopage et de la composition de la

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

structure. Parmi le système les plus utilisés, on cite ; les hétéro-structures de GaAs- $Al_xGa_{1-x}As$ en forme d'un puits quantique[12].

III.4.2.1) Les techniques de croissance épit axiale :

Les hétéro-structures sont produits par deux techniques sont : Les techniques modernes de croissance de cristaux semi-conducteurs, l'épitaxie par jet moléculaire **MEB** (moléculaire BeamEpitaxy), et le dépôt de phase vapeur à partir d'organométalliques **MOCVD** (Métal-OrganicChemical vapeur Dépositions), permettent de réaliser des couches monocristallines avec une matrice exceptionnelle de la composition chimique, et cristallographiques de l'épaisseur. La condition nécessaire à la réalisation d'une bonne hétéro-épitaxie d'un semi-conducteur (GaAlAs par exemple) sur un autre semi-conducteur (GaAs substrat par exemple) est évidemment que les deux matériaux aient d'autre part des paramètres de maille voisins (conditions satisfaites pour les GaAs et GaAlAs). En effet, si les structures cristallines sont différentes, le dépôt est généralement amorphe, autrement si les paramètres de maille sont différent, le matériau constituant la couche de plus grand épaisseur impose sa maille à l'autre, au moins de voisinage de l'interface ce qui conduit par des désordres.

Cependant, les différents types des semi-conducteurs, elle se composés du groupe III-V (comme : GaAs et GaAlAs) et leurs alliages respectifs, peuvent être épitaxies les uns sur les autres pour former différents types autres celle former par différents types d'hétéro-structures[11].

a) Principe del'épitaxie par jets moléculaires (MEB) :

La technique d'épitaxie par jets moléculaires, encore appelée MolecularBeamEpitaxy (**MBE**), développée dans les années **1970** aux Etats-Unis aux laboratoires Bell[15].

Consiste à faire interagir dans une enceinte sous ultravide (typiquement 10^{-10} à 10^{-11} Torr) un flux atomique ou moléculaire avec un substrat monocristallin. Cette interaction donne lieu à l'adsorption des atomes/molécules sur la surface. L'organisation des atomes adsorbés à la surface se fait de manière ordonnée et produit un arrangement cristallin. Généralement dans cette technique les échantillons préparés

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

constituent ainsi des outils précieux permettant une comparaison entre la théorie et l'expérience. Le dépôt par épitaxie s'effectue d'une manière contrôlée à la surface du Substrat monocristallin, permettant aux atomes ou molécules de s'organiser suivant la Cristallographie du substrat. Il faut néanmoins que les paramètres de maille du substrat et ceux du film à faire croître s'accordent. Dans le cas où cette condition est vérifiée, la vitesse lente du dépôt (typiquement quelques monocouches par seconde MC/s) permet de laisser le temps aux atomes incidents de migrer à la surface du cristal avant d'être adsorbés sur des sites préférentiels. La composition du film déposé dépend de la température du substrat et des flux relatifs des espèces déposées, c'est-à-dire du taux d'évaporation des cellules de diffusion. Ces flux sont orientés vers le substrat monocristallin, préalablement préparé et porté à une température permettant aux atomes de se déplacer en surface. Il est aussi possible d'arriver instantanément le flux d'un élément et de contrôler ainsi des changements de composition ou de dopage sur des échelles atomiques. La croissance par **MBE** s'effectue hors équilibre thermodynamique. Elle est gouvernée principalement par la cinétique des processus de croissance entre les couches atomiques superficielles du substrat et les atomes du flux incident. Par ailleurs, la vitesse de croissance est contrôlée par les flux d'éléments et permet ainsi de réaliser des dépôts avec une précision des épaisseurs, des compositions et des dopages.

Un des atouts de la **MBE** est qu'elle permet la mise en œuvre de techniques de caractérisation nécessitant des conditions d'ultravide. Dans notre cas, les techniques de caractérisation de surface et de composition présentant dans la **MBE** sont la diffraction d'électrons de haute énergie en incidence rasante (**RHEED**) et la spectroscopie des électrons Auger[13].

Les flux atomiques ou moléculaires proviennent de la sublimation (évaporation) d'éléments appropriés, par exemple dont le flux d'arsenic est constitué de molécules tétramères d'As₄, et les flux d'éléments III (Ga et Al) sont atomiques. Les températures des éléments et du substrat sont choisies selon la méthode des trois températures régie par les conditions : $T_V < T_{\text{substrat}} < T_{III}$.

En résumé, les caractéristiques de la croissance en épitaxie (**MBE**) sont les suivantes:

La vitesse de croissances à l'environnement d'une monocouche, permet de contrôler par seconde[11].

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

L'épaisseur des différentes couches d'une hétéro-structures au plan atomique est de l'ordre de nanomètre près.

La température de croissance est assez basse pour éviter les phénomènes d'inter-fusion alliages constituant l'hétéro-structures. En particulier, une diffusion des éléments dopants est ainsi évitée.

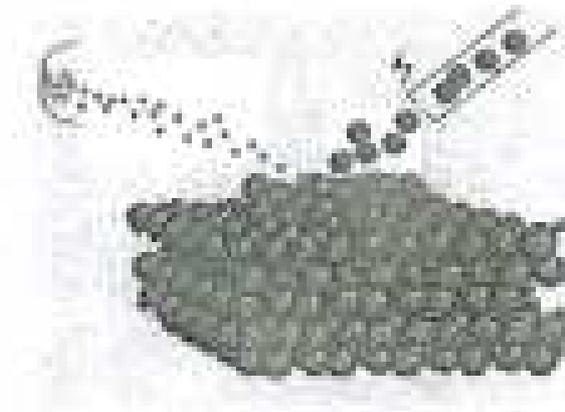


Figure (III.12) : Moléculaire Beam Epitaxy (MBE)[11].

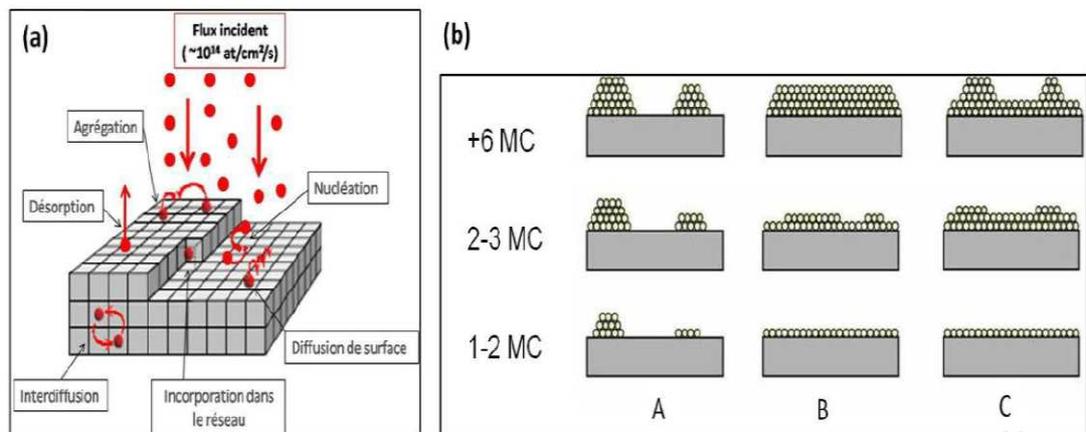


Figure (III.13) : (a) Illustration schématique des différents processus intervenant lors de la croissance épitaxiale par **MBE**. (b) Classification des différents modes de croissance: (A) Croissance 3D par formation d'îlots (Volmer-Weber) (B) Croissance 2D couche par couche (Frank-van der Merwe). (C) Croissance 2D puis 3D (Stranski-Krastanov)[14].

b) Chambre de croissance MBE :

Le modèle utilisé est un Compact 21S du fournisseur Ribler, dont le premier usage fût l'épitaxie de diamant, et comprend 7 piquages de cellules. La chambre est

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

pompée grâce à une pompe primaire à joint d'huile et une pompe turbo-moléculaire sur paliers magnétiques. Le vide limite est d'environ $6 \cdot 10^{-11}$ Torr et de l'ordre de 10^{-9} - 10^{-8} Torr pendant la croissance (1 Torr = 133 Pa = 4/3 mbar). La pression est mesurée avec une jauge Bayard-Albert et une jauge double (Pi rani-cathode froide). Un spectromètre de masse est installé sur l'un des piquages. Il n'est pas utilisé pendant la croissance, mais nous informe sur le type d'espèces chimiques présentes dans le bâti (hydrogène, CO₂, oxygène, H₂O, etc.). Le bâti est également équipé d'un panneau cryogénique, utilisé dans notre cas avec une circulation d'eau, Il est afin pour de refroidir les parois internes du système. Les deux cellules de silicium sont montées sur deux piquages latéraux qui présentent un angle de 45° avec le substrat et la cellule de carbone est installée sur le piquage central. La distance entre les cellules et le substrat est de 14 cm. La commande des alimentations des cellules se fait via un régulateur de Type PID d'Eurotherm.

Les substrats sont positionnés sur un ensemble composé d'un porte-substrat rotatif en molybdène et d'un four HTGH (High Temperature Graphite Heater, fabriqué par **MBE**Komponenten). Ce dernier peut être positionné à proximité immédiate de l'échantillon (à une distance de ≈ 1 cm) et le chauffer par rayonnement. La partie chauffante du four comprend un filament en graphite pouvant être porté jusqu'à 1900 °C environ (température du thermocouple).

Ainsi que des arrivées de courant et des blindages thermiques en graphite et tantale. Les substrats de carbone de silicium (SiC) utilisés étant transparents dans la gamme de longueurs d'onde émises par le filament. Un film de tungstène d'épaisseur typique de 200 nm est préalablement déposé en face arrière. Ce film permet de chauffer les échantillons sous ultravide en absorbant complètement le rayonnement du filament. Le contrôle de la température de l'échantillon est effectué via un pyromètre optique. Ce dernier est fonctionné dans l'infrarouge, le SiC est encore transparent à cette longueur d'onde. Le pyromètre mesure donc la température du film de tungstène déposé en face arrière. Il prend en compte une émissivité effective de 0.50 quand la face arrière de l'échantillon est dépolie. La température maximale des substrats peut atteindre environ 1500°C. Lors du fonctionnement de la cellule SuKo, à l'ouverture du cache, la température affichée par le pyromètre est légèrement augmentée ($\approx 10^\circ\text{C}$) à cause du flux, mais cela ne consiste en rien à une réelle augmentation de température d'échantillon[15].

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

III.4.2.2) Le dépôt de phase vapeur à partir d'organométalliques (MOCVD) :

La mise en place de la réaction a été effectuée entre Janvier 2001 et Septembre 2004, et résulte d'un travail commun entre le LTM et le LMGP, avec le support Technologies, JEPELEC, Air Liquide, ainsi que la maintenance du CEA ; il s'agissait donc de rattacher à un AFM-STM sous ultravide (lien \geq FM-STM à faire), déjà existant. Un bâti de dépôt MOCVD est utilisé. Les figures (II-4) présente la structure finale du bâti de dépôt et de caractérisation.

L'originalité de cet ensemble réside dans le couplage MOCVD. Microscope AFM-STM ; il est ainsi possible d'étudier les mécanismes de la croissance, sans remise à l'air des échantillons, donc sans perturber l'organisme de couche et sans la pollution.

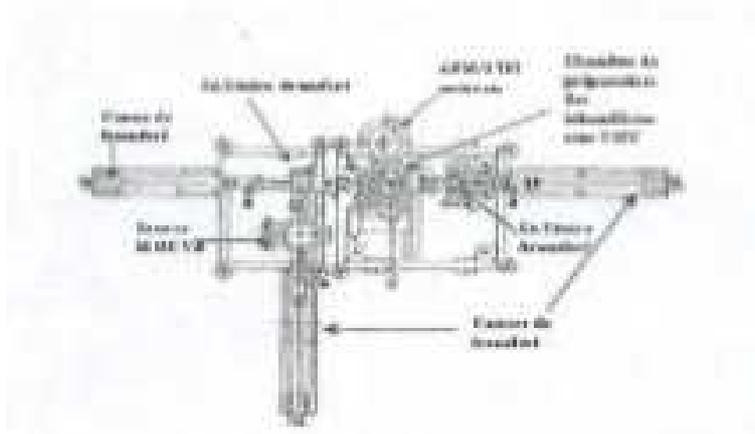


Figure (III.14) : schéma du bâti de dépôt et de caractérisation in situ vue de dessus.

Le réacteur de dépôt MOCVD injection pulsée on considère que le réacteur est formé de trois zones :

- les Injecteurs ; externes au réacteur, ils peuvent être démontée lors de la préparation des solutions de précurseurs.
- La Source ; c'est la zone de vaporisation.
- La zone de dépôt; lieu de la réaction chimique pour la formation du dépôt.

a) Les injecteurs :

Le bâti dispose de trois sources d'injections indépendantes (Figure III.15) qui peuvent fonctionner simultanément ou séparément. Ils sont pilotés électroniquement grâce à un boîtier de commande jipelec permettant de choisir la fréquence, le temps

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

d'injection et le nombre de gouttes à injecter afin de paramétrer le flux d'espèces gazeuses[5].

Les précurseurs organométalliques sont classiquement sous forme de poudre. Avant d'être injectés, ils sont dissous dans un solvant adéquat et introduits dans un réservoir relié aux injecteurs.

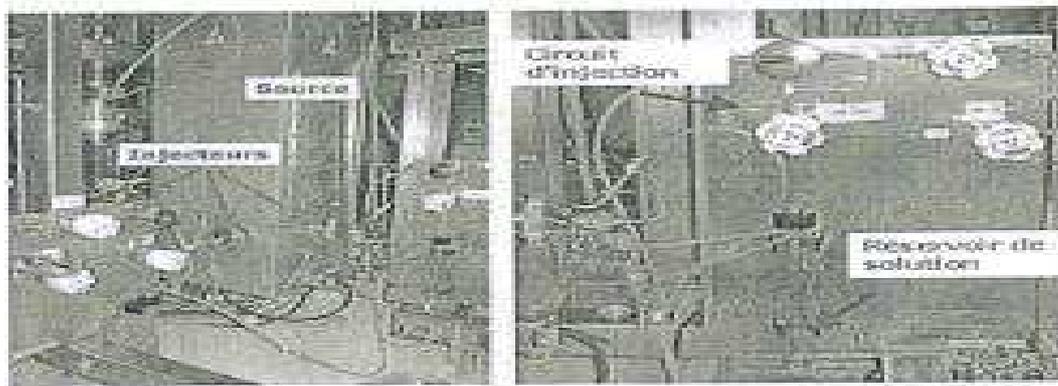


Figure (III.15) : photo des injecteurs et de source[12].

b) La source :

La source est protégée par un cache métallique pour des raisons de sécurité, elle est en effet maintenue en permanence à 2500C, température nécessaire à l'évaporation correcte des précurseurs. L'homogénéité en température est assurée le long de la source à ± 10 0C par une régulation 5 zones.

Les différentes étapes du transport des espèces gazeuses au sein de cette source sont les suivantes :

- Les gouttelettes de précurseur sont vaporisées dans un premier récipient, leur transport est alors assuré par un gaz neutre de l'argon.
- les gouttelettes sont mélangées à un flux d'oxygène, dans une seconde récipient, dont la géométrie permet l'écoulement turbulent à un mélange correct des différents flux.
- les vapeurs sont ensuite transportées sous flux laminaire dans un cylindre central avant d'arriver sur le substrat dans la zone de dépôt.

c) la zone de dépôt :

La zone de dépôt est constituée de l'enceinte de réaction, réalisée par MECA2000, du porte substrat chauffant et du système de pompage primaire du système de pompage primaire pour l'évacuation des gaz de réaction. Les parois du réacteur ne sont pas chauffées ; on parle d'un réacteur à murs froids : les précurseurs ne

Chapitre III : propriétés de transistor bipolaire

réagissent que sur le substrat qui est chauffé à une température adéquate. Le port substrat chauffant a été réalisé par la société ca burn. C'est un chauffage de type résistif qui permet d'atteindre des températures 600°C sur le substrat. Il peut être utilisé en atmosphère oxydante (100%O₂), jusqu'à des pressions de 6 mbar et des températures de 900°C (la température des éléments chauffants du four est différente de la température du substrat)[12].

Conclusion

générale

Conclusion générale

Dans cette conclusion, nous tenons à souligner les points essentiels suivants:

Nous avons étudié les semi-conducteurs **III-V** et leurs propriétés physiques par rapport à la conductivité et par rapport au gap.

Comme application des semi conducteurs, nous avons étudié la diode. Davantage, nous avons étudié l'effet de **transistor bipolaire** et la relation entre le courant d'émetteur (I_E) et le courant collecteur (I_C) et entre le courant de base (I_B) et le courant collecteur (I_C) dans le mode de fonctionnement et les Techniques de fabrication des hétéro-structure. Notre étude est basée sur les techniques anciennes (**MBE**) et celles modernes (**MOCVD**). Enfin on a déterminé la vitesse des trous et les électrons plongés dans un couple de champs (un champ électrique perpendiculaire à un champ magnétique)

Liste des figures

Liste des figures

	page
Figure (I.1) : Les trois états physiques de la matière	4
Figure (I.2) : Structure cristalline	8
Figure (I.3) : projection le réseau Orthorhombique	10
Figure (I.4) : Vue suivant l'axe c d'un réseau de Bravais monoclinique centré	11
Figure (I.5) : groupes ponctuels des réseaux de Bravais appartenant aux sept systèmes cristallins	12
Figure (II.1) : maille élémentaire diamant	14
Figure (II.2) : Liaison de covalence en (a) et création d'un pair électron trou en (b)	15
Figure (II.3) : Effet du dopage pour augmenter le nombre d'électrons libres.	16
Figure (II.4) : effet du dopage pour augmenter le nombre des trous libres.	17
Figure (II.5) : Le déplacement des trous	18
Figure (II.6) : diagrammes de bandes d'énergie des différents types d'éléments.	19
Figure (II.7) : valeur de la bande interdite du Si, Ge, et AsGa en fonction de la température.	20
Figure (II.8) : Structure cristalline du GaAs, liaison tétraédrique de la structure Zinc-blende.	21
Figure (II.9) : Bandes interdites à transition directe et indirecte dans les semi-conducteurs. À gauche transition directe (cas du GaAs).	22
Figure (II.10) : pas de collage entre les substrats et sone courbe de concentration des porteurs libres.	23
Figure (II.11) : collage des deux substrats.	23
Figure (II.12) : formation de la zone de charge d'espace (ZCE).	24
Figure (II.13) : concentration des porteurs libres.	24
Figure (II.14) : Le champ électrique de la ZCE, jonction stabilisée.	24
Figure (II.15) : Aux alentours de la ZCE.	25
Figure (II.16) : diode idéale polarisé direct.	26
Figure (II.17) : diode real.	27
Figure (III.1) : Transistron 1948.	29
Figure (III.2) : Transistor à contact	29

Liste des figures

Figure (III.3) : Transistor à jonction.	29
Figure (III.4): première application Portative du transistor entant que sonotone.	29
Figure(III.5) : Aperçu différents types de transistors .	30
Figure(III.6) : (a)(b) Représentations schématiques et symboles des transistors bipolaires .	31
Figure (III.7): Transistor bipolaire .	32
Figure (III.8) : Principe de superposition appliqué au bipolaire.	33
Figure (III.9) : Transistor PNP dans une configuration émettrice commune.	35
Figure (III.10) : Transistor PNP dans un montage base commune.	36
Figure (III.11) : Transistor PNP dans un montage collecteur commun.	36
Figure (III.12) : MoléculaireBeamEpitaxy (MBE).	41
Figure (III.13) : (a) Illustration schématique des différents processus intervenant lors de la croissance épit-axiale par MBE .(b) Classification des différents modes de croissance	41
Figure (III.14) : schéma du bâti de dépôt et de caractérisation in situ vue de dessus.	43
Figure (III.15) : photo des injecteurs et de source.	44

Références bibliographiques

[1] STRUCTURE CRISTALLINE CRISTAUX METALLIQUES, CHIMIE SPE PC-POINCARÉ 07/03/08

[2] Physique des solides Édition originale : *Solid State Physics*, Niel W. Ashcroft and N. David Mermin. @ SaundersCollegePublishing, 1976

[3]- GROVE (A.S.). – Physique et technologie des dispositifs à semi-conducteur. Dunod (1971).

[4]-Caractérisation et modélisation électrothermique non linéaire de transistors à effet de champ GaN pour l'amplification de puissance micro-onde Directeurs de thèse : Jean-Pierre TEYSSIER et Raymond QUERE

[5]-Brahimi Nassima, «Construction et exploitation d'une base de données sur les semi-conducteurs Magnétiques Dilués», Mémoire de Magister en Physique de la matière condensée et des semi-conducteurs, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen, (2011), Page : 11,12.

[6]-Rachid Khalil, «Étude d'un gaz bidimensionnel d'électrons dans des hétérostructures AlGaAs/GaAs par des mesures courant tension et bruit basses fréquences en température», Thèse de Doctorat En Physique, l'Université de Reims Champagne-Ardenne, (2005), Page : 45,46.

[7] Physique et technologie des composants de puissance Luc LASNE, université de Bordeaux 1 lasne@creea.u-bordeaux.fr

[8]-Kahn M. Transistor bipolaire à hétérojonction GaInAs/InP pour circuits ultra-rapides : structure, fabrication et caractérisation. Thèse doctorat Paris XI (2004), 258p.

[9] INTRODUCTION À L'ÉLECTRONIQUE ANALOGIQUE

Tahar Neffati

[10] Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques 6^{ème} édition Henry Mathieu et Hervé Fanet

[11] C. Ngô et H. Ngô, Physique des Semi-conducteurs, 2^{ème} édition, Dunod, Paris, (2007), Page 123-125,195.

[12] Aidi Nouara, Hétéro-structures les niveaux de Landau des électrons dans l'Al_xGa_{1-x}As, Mémoire de master en Physique, centre universitaire B.B.A, (2009), page 2,5-12,15.

[13] P. Kireev, la physique des semi-conducteurs, 2^{ème} édition, Edition Mir, Moscou (1981).

Références bibliographiques

[14]- Aurélie Spiesser, Croissance épitaxiale et propriétés magnétique d'hétérostructures de Mn₅Ge₂ sur Ge pour des applications en électronique de spin, Thèse doctorale en Physique et science de la Matière, Université de la Méditerranée Aix Marseille II, 06-01-2011, page : 28.

[15]Eléonore Morean , Elaboration de graphène par épitaxie par Jet Moléculaires et caractérisation, Thèse de doctorale en Micro et Nanotechnologies, Acoustique et Télécommunication, Université Lille 1 Sciences et Technologies , 09 décembre 2011, page : 45 ,46.

Résumé

Résumé

La recherche dans le domaine des sciences des matériaux et en particulier des semi-conducteurs a pris une ampleur considérable grâce à l'enjeu économique du traitement de l'information comme l'invention de transistor en 1947 depuis les chercheurs n'ont cessé de miniaturiser électronique. La technologie moderne basée sur l'amélioration de techniques de fabrication pour avoir meilleur fiabilité.

Mots clés : Transistor, semi-conducteurs, jonction PN, MBE, MOCVD.

Abstract

Research in the Field of materials science and in particular semiconductors has grown considerably thanks to the economic issue of information processing as the invention of the transistor in 1947 from researchers have continued to miniaturize e. Modern technology based on improved manufacturing techniques for betterre liability.

Keywords: Transistor, semiconductor ,PN junction, MBE, MOCVD