

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة سعد دحلب البليدة
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA



كلية الهندسة – دائرة الإلكترونيك
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MASTER

Spécialité : **Télécommunications et Réseaux**

**Etude et simulation d'une structure à base de
GaAsN/GaAs pour le Photovoltaïque**

Présenté par : **Hadj Ahmed Khaled**

Bensalem Lynda

Proposé par : **Aissat Abdelkader**

Co promoteur : **El Bey. M**

Session : **2010/2011**

A decorative border of white and pink flowers, including lilies and smaller white blossoms, surrounds the text. The flowers are arranged in a rectangular frame around the central text.

Remerciements

On remercie ALLAH le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Ce travail a été effectué au laboratoire (LATSI) département d'électronique faculté des sciences de l'ingénieur, sous la direction de monsieur le Dr Aissat.A, docteur à l'Université Saad Dahleb de Blida.

On lui exprime particulièrement toutes nos reconnaissances pour nous avoir fait bénéficier de ces compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.

On exprime nos sincères remerciements à monsieur El Bey. M, Enseignant à l'Université Saad Dahleb, de nous avoir aidé de son côté.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

Mes très chers parents Rabah et Sa dia

Ma sœur Massiva

Mes frères Abd Elghani et Nassim

Mes grands-mères

*Pour le cadre agréable avec lequel ils m'ont entouré
m'encouragent toujours à aller de l'avant*

A

Mes enseignants un par un

Mon binôme H.A Khalef

Mes amis Abd Elrrahim , Iyes

Abdou, Nabila, wafa, Samia

sarah, Amina , Adjou, Fatima

ben salem Lynda

Dédicace

Je dédis ce modeste travail à :

- *Mes très chers parents "Djelloul et Djahida".*
- *Mes sœurs Sarah et Roumayssa, mes frères Abderrahmane, Zakaria, Abdeljalil et à mon beau frère Abdelkader.*
- *Mes oncles et tantes.*
- *Mes très chers amis en citant : Omar, AbdelHafidh, Mehdi, Mustapha, Ishak, soufaine, toufik, Linda, Amina, Sarah, Adjou et fati, Khalifa, Mohamed Youcef et à tous que j'ai pas citer.*
- *Tous ce qui m'a aidé même si par un petit souhait pour que je termine ce travail.*

HADJ AHMED Khaled

ملخص

الهدف من هذا العمل هو تقديم نتائج بشأن توصيف الكهربائية والنمذجة في البيئة "مطلب" المولدات الكهروضوئية. نقوم بتحليل الانتاج الحالي من المولدات والطاقة الكهربائية التي توفرها المولدات وفقا لانتاج التيار الكهربائي من المولدات الكهربائية عبر الزمن. ويستند هذا النموذج الكهربائي على حصة من درجة الحرارة تقاطع الخلايا وغيرها من الشمس في الطائرة من لوحات، الأمر الذي يتطلب حساب الإشعاع العالمي على متن طائرة ميلا. وأظهرت النتائج أن أداة المحاكاة "مطلب" نماذج صالحة للطاقة الشمسية من ناحية، ومن ناحية أخرى القدرة على نموذج في حقل الكفاءة والسرعة الضوئية. وهذا يسمح لتشغيل صفائف الضوئية في الظروف المثلى، وبالتالي تحسين استخدام الطاقة الشمسية

Resumé

L'objectif de ce travail est de présenter les résultats concernant la caractérisation électrique et la modélisation dans l'environnement des générateurs photovoltaïques. Nous analysons le courant débité par le générateur ainsi que la puissance électrique fournie par ce générateur en fonction de la tension de sortie du générateur à l'échelle horaire. Le modèle électrique est fonction d'une part de la température de jonction des cellules et d'autre part de l'ensoleillement dans le plan des panneaux, ce qui a nécessité le calcul de l'irradiation globale sur un plan incliné. Les résultats obtenus montrent que l'outil de simulation « Matlab » valide les modèles électriques de conversion photovoltaïque d'une part, d'autre part la possibilité de modéliser d'une manière efficace et rapide un champ photovoltaïque. Ceci permet de faire fonctionner les générateurs photovoltaïques dans les conditions optimales et en conséquence une meilleure exploitation de l'énergie solaire.

Abstract

The objective of this work is to present the results concerning the electrical characterization and modeling in the environment PV generators. We analyze the current output by the generator and the electrical power supplied by the generator according to the output voltage of the generator across time. The electric model is based on a share of the junction temperature of the cells and the other of the sun in the plane of the panels, which required the calculation of the global irradiation on an inclined plane. The results show that the simulation tool "Matlab" valid models of photovoltaic power on the one hand, on the other hand the ability to model in an efficient and fast a photovoltaic field. This allows to operate the photovoltaic arrays in optimal conditions and therefore better use of solar energy

Introduction Générale :

La conversion photovoltaïque utilise le principe de la conversion directe de l'énergie lumineuse en une énergie électrique ; les cellules solaires sont capables d'effectuer cette transformation. La première cellule solaire à homojonction en silicium a été fabriquée en 1954 aux Laboratoires BELL avec un rendement voisin de 6%. En 1960, ce rendement a été porté à une valeur supérieure à 10% pour les cellules solaires à base de silicium monocristallin. De nombreux travaux de recherche sur l'amélioration du rendement de conversion ont été publiés. Jusqu'à 1972, les applications des cellules solaires étaient réservées au seul usage à cause de leurs prix de revient très élevés et leurs faibles rendements.

Cependant, il est à noter que l'augmentation du rendement a été considérée plus déterminante que la réduction du coût, car toute amélioration des performances, optimisation des paramètres, s'applique directement en pourcentage sur le prix de l'énergie produite.

Dans ce cas, l'objectif essentiel est l'accroissement du rendement. Ceci explique et justifie les recherches concernant l'étude des programmes numériques de conception, de modélisation et de simulation. Dans cet objectif, ce travail est abordé selon les chapitres suivants :

Dans un premier chapitre, nous rappelons quelques notions fondamentales nécessaires des semi-conducteurs, dont on a essayé de présenter les propriétés physiques de ces matériaux qui sont à la base de différents alliages ainsi que les différents modes optoélectroniques.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de quelques propriétés de l'alliage ternaire GaAsN ; l'incorporation de l'azote dans le GaAs apporte des changements dont on a fait la simulation pour les paramètres de maille, la contrainte ainsi que la détermination de la bande interdite, l'absorption, l'indice de réflexion et l'indice de réfraction.

Enfin, dans le dernier chapitre, nous décrivons les différents paramètres de la cellule solaire et leur effet sur les caractéristiques courant - tension (I-v) ainsi que la caractéristique puissance - tension (p-v) Pour notre matériau.

La liste des figures

- Figure I.1.** La structure diamant [1]
- Figure I.2 :** Structure de bande schématique d'un semi-conducteur direct et indirect [2]
- Figure I.3 :** Représentation des bandes d'énergie
- Figure I.4 :** présentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur intrinsèque
- Figure I.5 :** Semi-conducteur intrinsèque. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'états énergétique c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurées)
- Figure I.6 :** présentation des semi conducteurs dopé N et dopé P
- Figure I.7 :** Exemple : pour une jonction PN au silicium avec un dopage $N_A=10^{18}\text{cm}^{-3}$ dans la région p et un dopage $N_D=10^{17}\text{cm}^{-3}$ dans la région n, la hauteur de la barrière de potentiel à 300 K (27° C) à l'équilibre vaut 872mV
- Figure I.8 :** Connexion de la jonction en polarisation direct
- Figure I.9 :** Graphique des courants et tensions en polarisation directe
- Figure 1.10 :** Connexion de la jonction en polarisation inverse
- Figure I.11 :** Graphique des courants et tensions en polarisation inverse
- Figure I.12:** Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction
- Figure II.1 :** Exemple de l'incorporation de l'azote dans GaAs
- Figure II.2 :** la structure cristalline de GaAsN
- Figure II. 3 :** Energie de gap en fonction du paramètre de maille pour les alliages V-III. Arsenic
- Figure II.4 :** les paramètres de maille a, b et c d'un cristal
- Figure II.5:** Paramètre de maille en (Å°), en fonction de l'azote
- Figure II.6 :** Schéma de réseau cristallin (a) : pour une couche contrainte relaxée (b) : pour une couche contrainte en compression [11]
- Figure II. 7 :** Vu schématique,(a)d'une cellule couche et cellule substrat isolées (b)d'une couche unique contrainte en compression (c)d'un puits quantique.
- Figure II.8 :** effet de l'azote sur la contrainte
- Figure II.9 :** la variation de l'énergie de la bande interdite gap en fonction de l'azote
- Figure II.10 :** structure de bande d'un semi-conducteur a gap direct a) non contraint ; b) en compression; c)en tension

Figure II.11 : gap contraint

Figure II. 12 : la variation de l'énergie de la bande interdite gap en fonction de la température.

Figure II.13 : Le diagramme d'énergie du GaAs / GaAsN / InGaAs hétérostructures.

Figure II.14 : Schéma des transitions radiatives entre l'état minimal de la bande de conduction et l'état maximal de la bande de valence

Figure II.15: l'effet de l'azote sur l'énergie de transition

Figure II 16 : Schéma les transitions radiatives entre un état de la bande de valence et un état de la bande de conduction [9]

Figure II.17 : variation le l'absorption en fonction de la longueur d'onde

Figure II.18: Variation d'absorption en fonction de la longueur d'onde

Figure II.19 : variation de l'absorption en fonction de l'Energie du photon

Figure II.20 : le coefficient d'absorption alpha en fonction de la bande d'énergie E_g

Figure II.21 : coefficient d'absorption alpha en fonction de l'énergie du photon

Figure II.22 : variation de l'absorption en fonction de l'esnergie de photon pour (1) et (2)GaAsn(3)GaNBi

Figure II.23 : variation de l'indice de réfraction dans le puits en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de l'azote (Y)

Figure II.24 : variation de l'indice de réflexion dans le puits en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeur de y

Figure II.25 : variation de l'indice de réflexion dans l'air en fonction de la longueur d'onde.

Figure III.1 : structure de base d'une cellule solaire [12]

Figure III.2 : Caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire [12]

Figure III.3 : Schéma de La structure d'une cellule solaire et illustration des phénomènes de photo génération et de collecte de porteurs [14].

Figure III.4: Diagramme de bande dune cellule photovoltaïque [14].

Figure III.5:Transition inter bandes d'électrons dans un semi-conducteur, les cas d'un gap Indirect

Figure III.6 : variation du facteur de forme en fonction de la concentration de l'azote

Figure III.7: Schéma comparatif de phénomènes de réflexion sur une surface plane de Texture

Figure III.8 : Principe d'action d'une couche antireflet [14]

Figure III.9 : Composition d'une cellule photovoltaïque à haut rendement [14]

Figure III.10 : Caractéristique courant - tension d'une cellule PV température constante en
Fonction de l'éclairement

Figure III.11 : la variation de la puissance de sortie en fonction de la tension

Figure III.12 : variation de rendement en fonction de la concentration de l'azote

Figure III.13 : variation de rendement en fonction de la concentration de l'azote

Liste des tableaux

Tableaux I.1 : Tableau périodique des éléments

Tableau II. 1: Energie de gap et les paramètres de varshni des principeaux semi
– conducteurs à $t = 0$ au voisinage des points Γ, X, L .

Tableau II.2 : des coefficients de sellmeier pour les principaux binaires III.V

SOMMAIRE

Introduction Générale.....	1
Chapitre I: Généralités sur les semi conducteurs	
1. Introduction aux semi-conducteurs	2
2. Classification des éléments	3
3. Les systèmes cristallins	3
3.1. La structure diamant	4
4. Conducteur, semi conducteur, isolant	5
5. Types de semi-conducteurs	7
5.1. Semi conducteur intrinsèque	7
5.2. Semi conducteur dopé	10
5.2.1. La représentation simplifiée d'un semi conducteur dopé	10
5.2.2. Différents types de dopage	11
5.2.2.1. Semi- conducteur dopé n.....	11
5.2.2.2. Semi-conducteur dopé p	11
5.2.3 Avantage des semi conducteurs dopé	12
6. Le courant dans les semi-conducteurs.....	12
7. Types des matériaux semi-conducteurs.....	14
7.1. Matériaux semi-conducteurs monomères	14
7.2. Matériaux semi-conducteurs III-V binaires, ternaires et quaternaires.....	14
8. Défauts sur les semi-conducteurs	14
9. La jonction PN	15
9.1. Description.....	15
9.2. Barrière de potentiel	16
9.3. Polarisation d'une jonction.....	17
9.3.1. Polarisation directe.....	17
9.3.1.1. Graphique des courants et tensions en polarisation directe.....	17
9.3.2. Polarisation inverse.....	18
9.3.2.1. Graphique des courants et tensions en polarisation inverse	18
10. Effets optoélectroniques	19
10.1. Photodiode	19
10.1.1. Principe de fonctionnement.....	19
10.2. Mode photovoltaïque	20
10.2.1. L'effet photovoltaïque.....	20

10.3. Effet tunnel	21
11 . Conclusion	23

Chapitre II : Etude du Matériau GaAsN

1. Introduction	24
2. Incorporation de l' azote N dans GaAs	25
3 . La structure cristalline	26
4. Le choix du ternaire GaAsN	26
5. Paramètres de maille	27
6. Notion de couche contrainte (épaisseur critique)	29
7. la bande interdite	33
7.1. Gap direct	33
7.2. Gap indirect.....	33
8. Détermination de la bande interdite.....	34
8.1 Effet de la contrainte sur la bande interdite.....	35
8.2 Effet de la température sur la bande interdite	36
9. Calcul de l'énergie de transition	38
10. Absorption	40
10.1 Détermination de l'absorption	40
10.2 Augmentation singulière du coefficient d'absorption avec l'incorporation d'azote dans les alliages GaAsN et GaInAsN	43
11. Indice de réfraction.....	44
11.1 Détermination des indices de réfraction dans le matériau massif :.....	44
12. Indice de réflexion :	45
13. Conclusion :	48

Chapitre III : Etude et Simulation d'une cellule solaire

1. Introduction	50
2. La cellule solaire	51
2.1. Les différents types de cellules solaires [13].....	51
2.1.1. Les cellules mono- cristallines.....	51
2.1.2. Les cellules poly-cristallines	51
2.1.3. Les cellules amorphes	52
2.2. Structure classique d'une cellule solaire.....	52
2.3. Paramètres de la cellule solaire.....	53
2 .3.1. Courant de court-circuit, I _{cc}	54

2.3.2. Tension de circuit ouvert, V_{co}	54
2.3.3. Le rendement ..	54
2.3.4. Facteur de forme.....	54
2.4 Principe de fonctionnement de la cellule solaire.....	55
3. Pertes physiques.....	58
3.1. Pertes par les photons de grande longueur d'onde.....	58
3.2. Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons.....	58
3.3. Facteur de tension.....	58
3.4. Facteur de formes.....	59
5. Pertes technologiques.....	59
6.1. Réflectivité.....	59
6.2. Taux d'ombrage.....	60
6.3. Absorption incomplète due à l'épaisseur limite de la cellule.....	60
6.4 Rendement de collecte.....	60
6.5 Pertes liées à la recombinaison en surface.....	60
7. Technologie pour améliorer les performances des cellules solaires.....	60
7.1 Technologies pour réduction des pertes optiques.....	60
7.1.1 Texturisation de La surface.....	61
7.1.2 Couche antireflet (CAR).....	62
7.1.3 Réflecteur arrière BSR.....	63
7.1.4 La passivation.....	63
8. Conclusion	68
Conclusion générale.....	69

1. Introduction aux semi-conducteurs :

Le développement de la technologie des semi-conducteurs à base des matériaux III-V au cours de ces dernières années révolutionné l'électronique et l'optoélectronique. Ce qui a abouti à l'apparition des structures à couches semi-conductrices très fines et de très bonne qualité (pureté) et à l'avènement de nouveaux produits (diode, transistor, circuit intégrés, diode laser à semi-conducteurs) ainsi que les nanostructures (puits, et boîtes quantiques).

Avant l'invention du transistor bipolaire en 1947, les semi-conducteurs étaient présents dans seulement deux dispositifs électroniques qui sont les photodiodes et les redresseurs. Dans les années 1950, le germanium est le plus utilisé. Cependant, il ne peut pas être employé dans les applications nécessitant une faible consommation de courant et/ou soumises à de hautes températures. Le silicium, d'un coût moins élevé et permettant des applications à faibles consommations, sera très utilisé dès 1960.

La recherche sur les matériaux semi-conducteurs a commencé au début du 19^{ème} siècle. Au fil des années de nombreux semi-conducteurs ont été étudiés. Parmi les plus célèbres, nous trouvons le silicium (Si) et le germanium (Ge) de la colonne IV du tableau périodique. Ces deux semi-conducteurs sont composés d'atomes identiques, mais d'autres, comme l'arséniure de gallium GaAs (III-V) sont composés d'atomes d'éléments différents : Ga (III) et As (V). La composition de semi-conducteurs permet d'accéder à des propriétés électriques et optiques que n'ont pas les semi-conducteurs purs.

2. Classification des éléments :

■ Métaux		■ Semi-conducteurs		■ Non-métaux		■ Gaz nobles		■ Lanthanides et actinides		Li : Solide à 25°C, sous 1 bar He : Gaz à 25°C, sous 1 bar Br : Liquide à 25°C, sous 1 bar Tc : Obtenu par synthèse	
----------	--	--------------------	--	--------------	--	--------------	--	----------------------------	--	--	--

I																		VIII									
1	H																	He									
2	Li Be																	B C N O F Ne									
3	Na Mg																	Al Si P S Cl Ar									
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr									
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe									
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn									
7	Fr	Ra	Lw	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Uun	Uuu	Uub															
Série des Lanthanides			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb											
Série des Actinides			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No											

Tableaux I.1 : Tableau périodique des éléments

3. Les systèmes cristallins :

Ils existent deux états solides: un état dit amorphe, dans lequel la disposition des atomes est aléatoire, ou un état cristallisé, caractérisé par un arrangement périodique des atomes. Les solides amorphes sont généralement appelés des verres et considérés comme des liquides de monocristaux, si la périodicité est interrompue dans tout le volume, ou des poly-cristaux, s'il existe une périodicité locale et que le solide est composé d'un ensemble de grains cristallins de taille à peu près uniforme. Prise matière condensée peut prendre deux états solides différents, suivant la haute viscosité. Les solides cristallisés peuvent former les trois théories générales des Semi-conducteurs par TEM (Transmission Electron Microscopy), une vue de coupe du réseau cristallin du silicium permet d'observer sa périodicité. Le résultat est un ensemble ordonné, ou

localement ordonné, des noyaux d'atomes et d'électrons liés entre eux par des forces principalement coulombiennes. Ces forces sont plus ou moins importantes suivant l'électronégativité des éléments intervenant dans les liaisons, ce qui confère aussi des propriétés mécaniques et électriques au solide cristallisé résultant. On distingue quatre familles de solides cristallins : les cristaux ioniques, les cristaux covalents, les métaux et les cristaux moléculaires [4].

3.1 La structure diamant :

Dans la structure diamant chaque atome est entouré de 4 plus proches voisins, ce qui permet de former des liaisons covalentes. Elle peut être décrite comme étant formée de 2 structures f.c.c. déplacées l'une par rapport à l'autre le long de la diagonale principale. La position de l'origine de la seconde structure f.c.c. par rapport à l'origine de la première est $(1/4, 1/4, 1/4)$. Le diamant cristallisé dans cette structure, mais aussi le Silicium et le Germanium.[1]

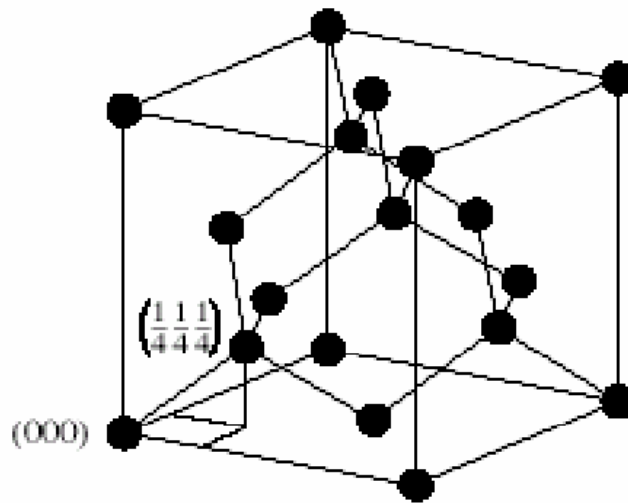


Figure I.1. La structure diamant [1]

Cette structure est typique des éléments de la colonne IV du tableau périodique, mais aussi des composés III – V dans lesquels les sites $(0, 0, 0)$ et $(1/4, 1/4, 1/4)$ sont occupés par différents types d'atomes. On parle dans ce cas de structure Zinc blende.

La structure de bande est la relation entre l'énergie de la particule et son vecteur k : $E(k)$. On représente l'évolution de l'énergie de l'électron par la courbe $E(k)$ en forçant le vecteur d'onde

k à demeurer dans une direction remarquable de l'espace des k, c'est-à-dire une direction cristallographique du réseau réciproque. [1]

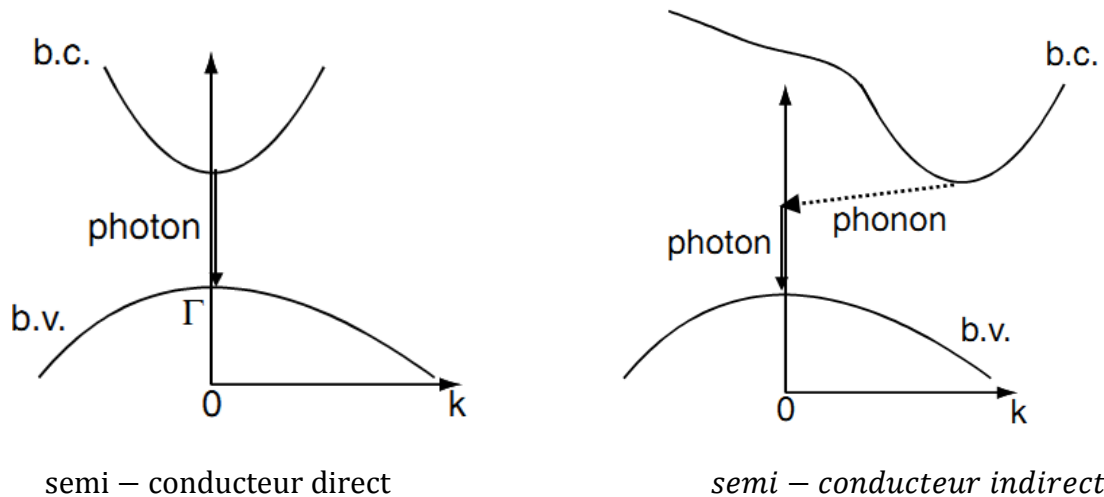


Figure I.2 : Structure de bande schématique d'un semi-conducteur direct et indirect [2]

Le maximum de la bande de valence est à $k=0$. Deux bandes de valence sont importantes : la bande des trous lourds et celle des trous légers ; chacune accepte deux électrons. En plus, une troisième bande est prise en considération : la bande dite "spin-off" ainsi appelée car elle est découplée des autres par l'interaction spin-orbite.

Une propriété très importante des structures de bandes du Si et Ge est que le minimum de la bande de conduction, au contraire de la bande de valence, n'est pas à $k=0$. Les semi-conducteurs qui sont tels que le minimum de la bande de conduction n'est pas au même point que le maximum de la bande de valence sont appelés semi-conducteurs indirects [2]

4. Conducteur, semi conducteur, isolant :

Les matériaux solides peuvent être classés en trois groupes qui sont les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs, On considère comme :

- ❖ Isolants les matériaux de conductivité $\sigma < 10^{-8} \text{ S/cm}$, pour le diamant 10^{-14} S/cm .
- ❖ semi-conducteurs les matériaux tels que $10^{-8} \text{ S/cm} < \sigma < 10^3 \text{ S/cm}$, par exemple le silicium de 10^{-5} S/cm
- ❖ conducteurs les matériaux tels que $10^3 \text{ S/cm} < \sigma$, pour l'argent 10^6 S/cm .

Les propriétés électriques d'un matériau sont fonction des populations électroniques des différentes bandes permises. La conduction électrique résulte du déplacement des électrons à l'intérieur de chaque bande. Sous l'action du champ électrique appliqué au matériau l'électron acquiert une énergie cinétique dans le sens opposé au champ électrique. Considérons à présent une bande d'énergie vide, il est évident de par le fait qu'elle ne contient pas d'électrons, elle ne participe pas à la formation d'un courant électrique. Il est de même pour une bande pleine. En effet, un électron ne peut se déplacer que s'il existe une place libre (un trou) dans sa bande d'énergie. Ainsi, un matériau dont les bandes d'énergie sont vides ou pleines est un isolant. Une telle configuration est obtenue pour des énergies de gap supérieures à $\sim 9\text{eV}$, car pour de telles énergies, l'agitation thermique à 300K , ne peut pas faire passer les électrons de la bande de valence à celle de conduction par cassure de liaisons électroniques. Les bandes d'énergie sont ainsi toutes vides ou toutes pleines.

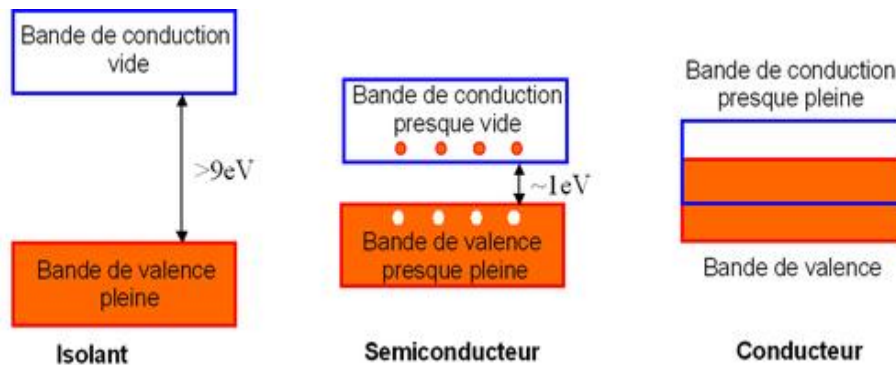


Figure I.3 : Représentation des bandes d'énergie

Un semi-conducteur est un isolant pour une température de 0K . Cependant ce type de matériau ayant une énergie de gap plus faible que l'isolant ($\sim 1\text{eV}$), aura par agitation thermique ($T=300\text{K}$), une bande de conduction légèrement peuplée d'électrons et une bande de valence légèrement dépeuplée. Sachant que la conduction est proportionnelle au nombre d'électrons pour une bande d'énergie presque vide et qu'elle est proportionnelle au nombre de trous pour une bande presque pleine, on déduit que la conduction d'un semi-conducteur peut être qualifiée de «mauvaise».

Pour un conducteur, l'interpénétration des bandes de valence et de conduction implique qu'il n'existe pas d'énergie de gap. La bande de conduction est alors partiellement pleine (même aux basses températures) et ainsi la conduction du matériau est « élevée ».

* **la bande de valence** : c'est la bande énergétique des électrons qui assurent les liaisons covalentes (réalisées par les électrons de valence) entre les atomes du réseau.

* **la bande de conduction** : c'est la bande d'énergie immédiatement supérieure à la bande de valence.

5. Types de semi-conducteurs :

5.1. Semi conducteur intrinsèque :

Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur non dopé, c'est à dire qu'il contient peu d'impuretés (atomes étrangers) en comparaison avec la quantité de trous et d'électrons générés thermiquement. Pour mieux appréhender le comportement des semi-conducteurs, nous devons étudier plus en détail les populations d'électrons et de trous dans chacune des bandes de conduction et de valence. Aussi, nous allons réaliser un bilan électronique des semi-conducteurs intrinsèques. Pour ce faire, nous devons introduire la notion de densité d'états énergétique $N(E)$. Cette grandeur, dépendante de l'énergie électronique E , correspond à la place disponible pour les électrons dans la bande de conduction $N_C(E)$ et à la place disponible pour les trous dans la bande de valence $N_V(E)$. Pour des énergies proches des extrema de ces deux bandes, son tracé est parabolique :

$$N_C(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_c}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{E - E_C} \quad (I.1)$$

[cm⁻³/eV]

$$N_V(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_v}{\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{E_V - E} \quad (I.2)$$

Où : $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ est la constante de Planck normalisée $h = 6.626 \cdot 10^{-34} JS$

m_c, m_v les masses effectives de densité d'états dans la bande de conduction et dans la bande de valence respectivement.

Pour un semi-conducteur à gap direct m_c, m_v désignent la masse effective d'un l'électron m_e et d'un trou m_h dans le cristal respectivement.

Le concept de masse effective introduit dans les expressions précédentes permet de traiter les électrons (et les trous) qui sont dans le cristal des particules quasi-libres, comme des quasi-particules libres. Le semi-conducteur devient alors un gaz d'électrons et de trous spécifiques par leurs masses effectives parfois très différentes de celle de la particule libre. A titre d'exemple pour le GaAs, $m_c/m_0 = 0.066$ avec $m_0 = 0.911 \cdot 10^{-30} kg$ la masse de l'électron libre.

Afin d'obtenir le nombre effectif d'électrons et de trous dans chacune des bandes, la densité d'état ne suffit pas, il faut aussi connaître la probabilité de présence d'un électron sur un niveau d'énergie E . Cette probabilité est donnée par la fonction de Fermi-Dirac :

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E - E_F)/kT]} \quad (I.3)$$

Où $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{jk}^{-1}$ est la constante de Boltzmann, T la température et E_F l'énergie de Fermi considérée comme le potentiel chimique des semi-conducteurs.

Il va de soit que la probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie E par un trou est $1 - f(E)$ car l'absence d'un électron implique la présence d'un trou et vice versa.

La densité d'électrons n [cm^{-3}] dans la bande de conduction est alors obtenue en sommant sur toute la plage d'énergie couverte par cette bande, la « place » disponible pour les électrons à l'énergie E pondérée par la probabilité de « trouver » un électron à ce même niveau d'énergie :

$$n = \int_{E_C}^{+\infty} N_C(E) \cdot f(E) dE \quad (I.4)$$

De même pour la densité des trous p [cm^{-3}] dans la bande de valence:

$$P = \int_{-\infty}^{E_V} N_V(E) \cdot (1 - f(E)) dE \quad (I.5)$$

Pour un semi-conducteur dont le niveau de Fermi E_F est distant des extrema de plus de $3kT$, la fonction de Fermi se simplifie sous une forme exponentielle et on obtient pour l'écriture des densités de porteurs :

$$n = N_C \exp\left[-\frac{E_C - E_F}{KT}\right] \quad (I.6) \quad , \quad N_C = \int_{E_C}^{+\infty} N_C(E) \cdot \exp\left[-\frac{E - E_C}{KT}\right] dE \quad (I.7)$$

$$P = N_V \exp\left[\frac{E_V - E_F}{KT}\right] \quad (I.8) \quad , \quad N_V = \int_{-\infty}^{E_V} N_V(E) \cdot \exp\left[\frac{E - E_V}{KT}\right] dE \quad (I.9)$$

Où N_C et N_V sont les densités équivalentes (ou effectives) d'états. Elles représentent en quelque sorte le nombre d'états utiles, à la température T , dans leur bande d'énergie respective.

Remarquons que la relation donnée par le produit des densités de porteurs est indépendante du niveau de Fermi. Elle est donc valable pour les semi-conducteurs intrinsèques mais aussi extrinsèques.

$$np = n_i^2 \quad , \quad n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp \left[- \frac{E_C - E_V}{2kT} \right] \quad (I.10)$$

Où n_i sera la densité de porteurs intrinsèques (pour le silicium à 300K, $n_i = 10^{10} \text{cm}^{-3}$).

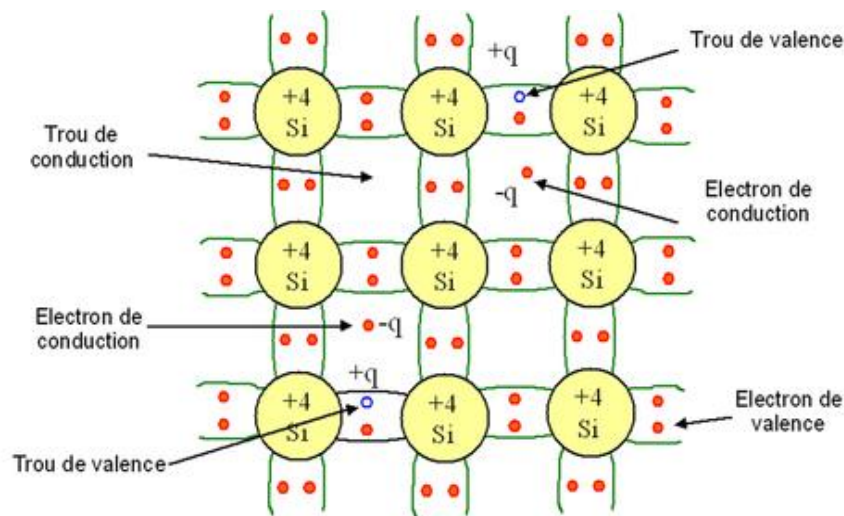


Figure I.4 : Présentation schématique des liaisons électroniques pour le semi-conducteur intrinsèque

La figure I.4 montre que pour un semi-conducteur intrinsèque (sans impuretés), à chaque électron de la bande de conduction correspond un trou dans la bande de valence. De cette constatation, nous déduisons que les densités d'électrons et de trous sont identiques pour ce type de semi-conducteur.

$$n = p = n_i \quad (I.11)$$

En remplaçant les densités de porteurs par leurs expressions respectives, l'égalité précédente nous permet de définir le niveau de Fermi pour un semi-conducteur intrinsèque E_{Fi} . Sachant qu'à la température ambiante, kT est très inférieur au gap ; ce niveau se trouve très proche du milieu de la bande interdite :

$$E_{Fi} = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_V}{N_C} \simeq \frac{E_C + E_V}{2} \quad (I.12)$$

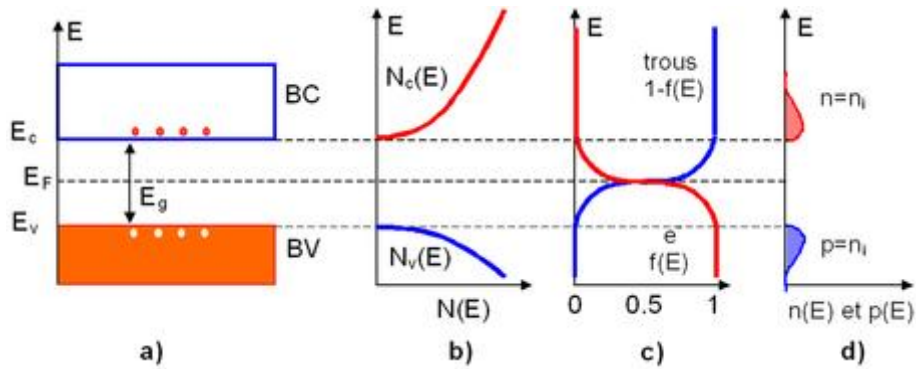


Figure I.5 : Semi-conducteur intrinsèque. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'états énergétique c) Distributions de Fermi-Dirac d) Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurées)

5.2. Semi conducteur dopé :

Dans le domaine de semi-conducteurs, un dopant est une impureté ajoutée en petites quantités à une substance pure afin de modifier ses propriétés de conductivité.

Les propriétés des semi-conducteurs sont en grande partie régies par la quantité de porteurs de charge qu'ils contiennent. Ces porteurs sont les électrons ou les trous. Le dopage d'un matériau consiste à introduire dans sa matrice des atomes d'un autre matériau. Ces atomes vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous.

Les atomes du matériau dopant sont également appelés impuretés, et sont en phase diluée : leur concentration reste négligeable devant celle des atomes du matériau initial

5.2.1. La représentation simplifiée d'un semi conducteur dopé :

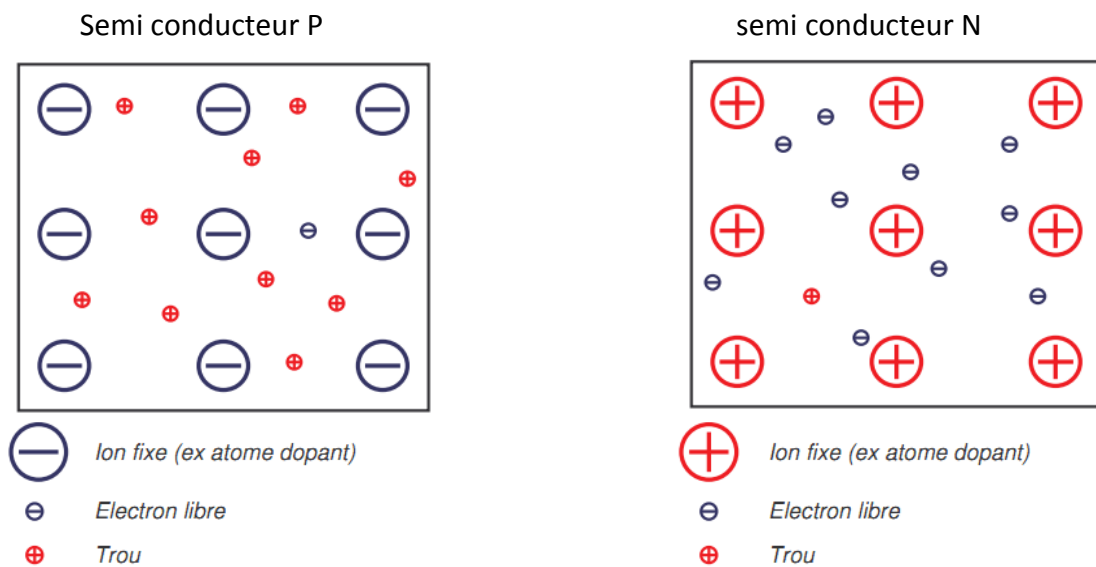


Figure I.6 : Présentation des semi conducteurs dopé N et dopé P

5.2.2. Différents types de dopage :

Les semi conducteurs intrinsèques n'ont pas une grande utilité en tant que tels ; ils Servent de base aux semi-conducteurs dopés : on y rajoute des impuretés pour modifier leur Comportement. Il existe deux types de semi conducteurs extrinsèques [8]

5.2.2.1. Semi- conducteur dopé n :

Le matériau dopé n est un semi-conducteur dont la concentration en électrons est largement supérieure à la concentration en trous. On y a introduit généralement du Phosphore, de l'Arsenic ou encore de l'Antimoine. Prenons par exemple le cas du Silicium dans lequel on introduit de l'arsenic (possède 5 électrons sur la couche extérieure). L'arsenic à un niveau donneur E_d dans la bande interdite très proche de la bande de conduction. L'intérêt est que pour les températures supérieures à 0K, les atomes d'arsenic sont ionisés ce qui revient à faire passer l'électron du niveau donneur à la bande de conduction. La concentration de donneurs sera donc supérieure à la concentration d'accepteurs ($N_d - N_a > 0$) ce qui correspond à la définition d'un semi-conducteur dopé n.

A la température ambiante pratiquement tous les donneurs sont ionisés et si la concentration en atomes donneurs est N_d , la densité de porteurs libres du semi-conducteur sera :

$$n = n_0 + N_d \quad (I.13)$$

Où n_0 est la densité d'électrons générés par le processus de rupture de liaisons de covalence qui engendre des paires électrons-trous.

5.2.2.2. Semi-conducteur dopé p :

Il s'agit d'un semi-conducteur dont la concentration en trous est largement supérieure à la concentration en électrons. On y a introduit généralement du Bore, de l'Aluminium, du Gallium ou encore de l'Indium, prenons le cas du Silicium dans lequel on introduit du Bore. On associe au Bore un niveau accepteur E_a dans la bande interdite très proche de la bande de valence [1].

De la même façon que pour le semi-conducteur dopé n, la concentration en trous du Semi-conducteur sera :

$$P = p_0 + N_a \quad (I.14)$$

5.2.3. Avantage des semi conducteurs dopé :

Comme les niveaux énergétiques des éléments dopants se situent entre les bandes de valence et de conduction du silicium, le nombre des transitions d'électrons est bien plus important que dans les semi-conducteurs intrinsèques. Partant, la conductivité électrique des semi-conducteurs est supérieure à celle des semi-conducteurs intrinsèques.

Mais l'énorme avantage du dopage consiste en ce que l'on dispose maintenant de 2 types de conducteurs différents, l'un conduisant le courant électrique par « sauts d'électrons » (charges négatives), l'autre par « sauts de trous » (assimilables à des charges positives).

Lorsque nous appliquons une source électrique aux 2 types de conducteurs, la migration des porteurs de charges (électrons ou trous) se fait en sens inverse. C'est en effet l'association des 2 types de semi-conducteurs qui permet la réalisation des deux applications qui sont à la base de l'électronique moderne : la diode et le transistor.

6. Le courant dans les semi-conducteurs :

Les courants dans le semi-conducteur résultent du déplacement des porteurs de charge, électrons et trous, sous l'action de différentes forces. L'origine de ces forces étant un champ électrique (courant de conduction) ou un gradient de concentration (courant de diffusion) [5]. Le courant de conduction est le courant que l'on rencontre dans les métaux et qui est proportionnel au champ électrique:

$$J_{c_n} = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E \quad (I.15)$$

$$J_{c_p} = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E \quad (I.16)$$

Ces relations sont valables pour des champs électriques suffisamment faibles pour que la vitesse des porteurs reste proportionnelle au champ. Le courant total s'écrit alors [4]:

$$J_{tot} = q(n\mu_n + p\mu_p)E = \sigma E \quad (I.17)$$

Ainsi, la conductivité $\sigma(T)$ et la résistivité $\rho(T)$, sont données par :

$$\sigma(T) = q(n\mu_n(T) + p\mu_p(T)) \quad (I.18)$$

$$\rho(T) = \frac{1}{q(n\mu_n(T) + p\mu_p(T))} \quad (I.19)$$

Considérons un semi-conducteur dopé dont la concentration en trous varie suivant un axe x . La densité de courant de diffusion en un point d'abscisse x est:

$$J_{D_p} = -qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad (I.20) \quad \text{Où} \quad D_p = \mu_p \frac{KT}{q} \quad (I.21)$$

D_p est la constante de diffusion.

Les porteurs en excès tendent à se donner une concentration uniforme. Il en est de même dans le cas des électrons de concentration $n(x)$ et on a:

$$J_{D_n} = qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad (I.21) \quad \text{Où} \quad D_n = \mu_n \frac{KT}{q} \quad (I.22)$$

Lorsque les deux phénomènes existent simultanément la densité totale de courant pour les électrons et les trous est donnée, en explicitant la relation de dépendance avec la température, par :

$$J_n = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E + q \cdot D_n \frac{dn}{dx} \quad (I.23)$$

$$J_p = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E - q \cdot D_p \frac{dp}{dx} \quad (I.24)$$

Ces relations sont valables pour des champs électriques suffisamment faibles pour que la vitesse des porteurs reste proportionnelle au champ. Le courant total s'écrit alors [4]:

$$J_{\text{tot}} = J_n + J_p \quad (I.25)$$

Les constantes D_p et D_n sont liées aux mobilités μ_n et μ_p par la relation d'Einstein :

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q} = V_T \quad (I.26)$$

7. Types des matériaux semi-conducteurs :

7.1. Matériaux semi-conducteurs monomères :

Pour une application donnée, on peut choisir tel ou tel semi conducteur en fonction de ses propriétés spécifiques, sachant que les semi-conducteurs idéaux présentent toutes les qualités souhaitables n'existent pas, le choix d'un semi-conducteur devant se faire d'après l'ensemble de ses propriétés électroniques.[3]

7.2. Matériaux semi-conducteurs III-V binaires, ternaires et quaternaires :

Les semi-conducteurs III-V sont des solides contenant des corps composés par un élément de la colonne III et un élément de la colonne V de la classification périodique.

Parmi tous les composés binaires possibles tous ne présentent pas le même intérêt. Les composés binaires contenant le bore, l'aluminium et l'azote donnent des composés dont la largeur de bande interdite est large et indirecte, d'une manière générale ils présentent peu d'intérêt comme matériaux actifs en optoélectronique et électronique rapide. Les composés à base de gallium ou d'indium ont des propriétés très intéressantes ; l'intérêt pratique. Des matériaux III-V est renforcé par la possibilité de fabriquer des alliages ternaires et quaternaires par substitution partielle de l'un des éléments par un élément de la même colonne.

L'énergie de bande interdite de ces alliages varie en fonction des paramètres cristallins qui dépendent eux-mêmes de la composition des matériaux ternaires ou quaternaires. Ce type de variation est très important puisqu'il permet de connaître la composition de tout alliage susceptible d'être déposé en couche mince, par épitaxie sur un substrat binaire. Ainsi, ces matériaux composés offrent une grande variété de compositions permettant de varier les propriétés optiques et électroniques. [3]

8. Défauts sur les semi-conducteurs :

Dans un lingot monocristallin plusieurs défauts peuvent être présents. La localisation de ces défauts sur l'emplacement du circuit intégré peut entraîner son rejet et baisser ainsi le rendement de fabrication. Les défauts les plus importants sont les dislocations ; ce sont les

imperfections dans la structure locale du cristal qui sont causées par des déformations plastiques lors d'un traitement thermique ou qui sont dues à la présence de certaines impuretés.

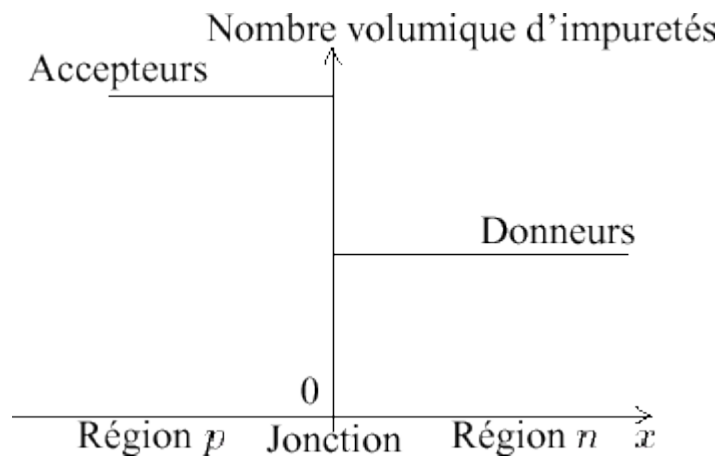
Les défauts intrinsèques et les dopants induisent l'existence de niveaux localisés dans la bande interdite. Les transitions électroniques qui impliquent un de ces niveaux et une des deux bandes donnent naissance à la photoconductivité. Les ions présents dans le cristal, possèdent également des bandes internes très caractéristiques de leur valence et du site qu'ils s'occupent [1].

9. La jonction PN :

La jonction PN est à la base de la plupart des applications des semi conducteurs. Elle est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur de type P et d'un semi-conducteur de type N. Dans la zone de contact, les électrons libres du segment N pénètrent dans le segment P et se recombinent avec les trous. De même, les trous du segment P pénètrent appelé diffusion.

9.1. Description :

Soit le semi- conducteur à dopage non uniforme ci-dessous qui présente une région p à nombre volumique d'atomes accepteurs constant, suivi immédiatement d'une région n à nombre volumique de donneurs constant également.



La surface de transition entre les deux régions est appelée jonction PN abrupte. Du fait de la continuité du réseau cristallin, les "gaz" de trous de la région p et d'électrons de la région n ont tendance à uniformiser leur concentration dans tout le volume à disposition. Cependant, la diffusion des trous vers la région n et des électrons libres vers la région p provoque un déséquilibre électrique si bien que, dans la zone proche de la jonction, la neutralité électrique

n'est plus satisfaite. On trouve, dans la région p, des atomes accepteurs et des électrons, soit une charge locale négative, et dans la région n, des atomes donneurs et des trous, soit une charge locale positive. Il s'est donc créé un dipôle aux abords de la jonction et, conjointement, un champ électrique. Une fois l'équilibre atteint, ce champ électrique est tel qu'il s'oppose à tout déplacement global de charges libres.

9.2. Barrière de potentiel :

Il existe, entre la région p et la région n, une barrière de potentiel U_{B0} énergétique pour les charges mobiles. L'existence de cette barrière se traduit par une différence de potentiel électrique liée au champ de rétention de la diffusion comme le montre la figure 1.7:

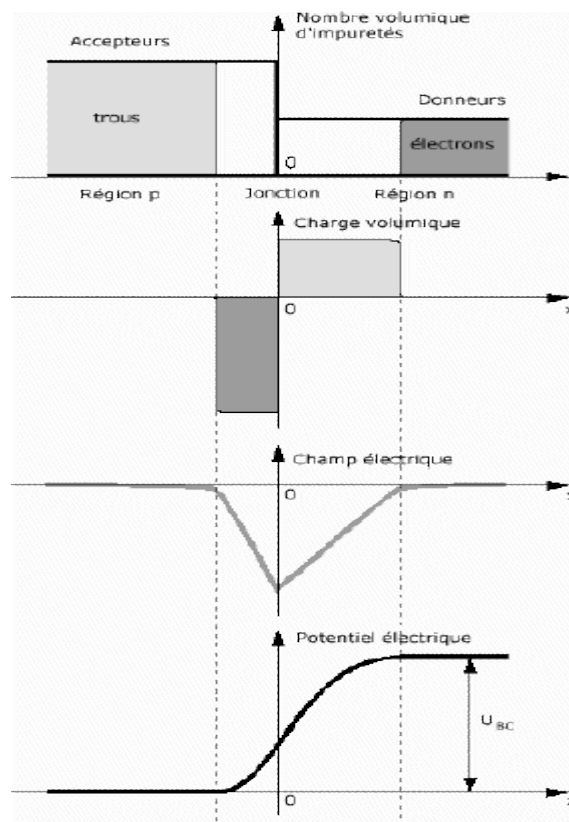


Figure I.7 : Exemple : pour une jonction PN au silicium avec un dopage $N_A=10^{18}\text{cm}^{-3}$ dans la région p et un dopage $N_D=10^{17}\text{cm}^{-3}$ dans la région n, la hauteur de la barrière de potentiel à 300 K (27° C) à l'équilibre vaut 872 mV.

Remarque : la hauteur de la barrière de potentiel à l'équilibre est telle que les trous qui sont dans la région p ont une énergie moyenne qui est juste assez insuffisante pour leur interdire de passer la barrière de potentiel. Il en va de même pour les électrons qui se trouvent dans la région n.

9.3. Polarisation d'une jonction :

9.3.1. Polarisation directe :

En polarisation directe la borne négative doit être connectée à la région n. La borne positive est connectée à la région P, comme illustré sur la figure I.8 :

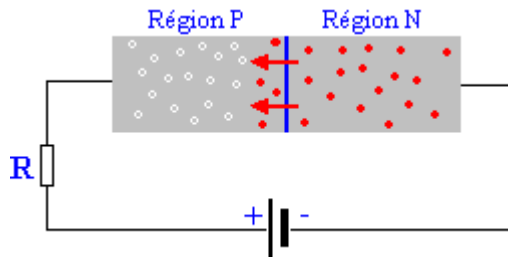


Figure I.8 : Connexion de la jonction en polarisation directe

Si la tension est plus grande que 0,7 v (pour le silicium), les électrons passent la jonction. Une fois dans la partie P, ils se recombinent avec les trous et deviennent des électrons de valence. Comme ils sont attirés par la borne positive, ils se déplacent de trou en trou jusqu'à celle-ci. Les trous sont donc toujours disponibles pour les électrons suivants et sont donc toujours disponibles. Cette configuration est appelée « polarisation directe », car elle permet le passage du courant provenant de l'alimentation. la région d'appauvrissement est fortement amincie lors de la polarisation directe.

9.3.1.1. Graphique des courants et tensions en polarisation directe :

En polarisation directe, le courant demeure très faible tant que le seuil de 0,7 v n'est pas franchi. Si la tension aux bornes de la jonction est supérieure à 0,7 v, il y a donc un courant qui est créé. Celui augmente très fortement lorsque nous augmentons la tension de polarisation, même faiblement. C'est ces caractéristiques que montre le graphique ci-dessous. x représente la tension, l'axe Y représente le courant.

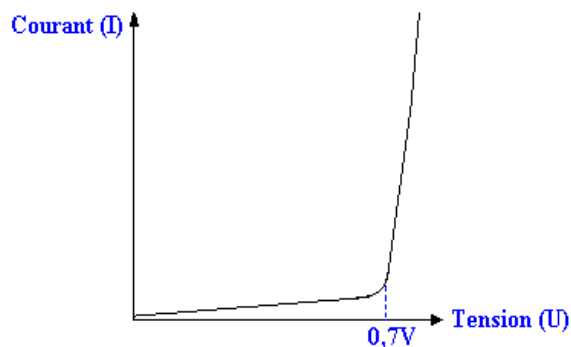


Figure I.9 : Graphique des courants et tensions en polarisation directe

9.3.2. Polarisation inverse :

En polarisation inverse, la borne positive est connectée à la région N. La borne négative se trouve connectée à la région P. Les électrons libres sont alors attirés vers la borne positive. Les trous sont attirés vers la borne négative, comme le montre l'illustration ci-dessous (figure I.10) :

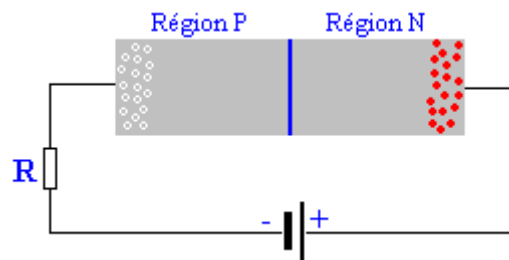


Figure 1.10 : Connexion de la jonction en polarisation inverse

Dans cette situation, le passage d'un courant est impossible. Toutefois, il subsiste un courant inverse extrêmement faible. Celui-ci provient des paires électron-trou générées par la chaleur. Ce courant est si infime qu'il est systématiquement négligé. Notez qu'en polarisation inverse, la région d'appauvrissement est considérablement élargie.

9.3.2.1. Graphique des courants et tensions en polarisation inverse :

En polarisation inverse, le courant demeure très faible tant que la tension de claquage n'est pas atteinte. Cette tension est le seuil à partir duquel le courant est trop intense et détruit la structure de la jonction. Celle-ci ne doit donc jamais être utilisée au-delà de la tension de claquage. Un graphique résumant ces explications est donné ci-dessous (figure I.11) :

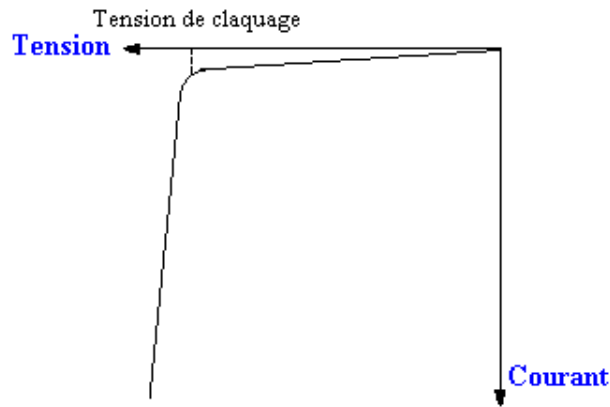


Figure I.11 : Graphique des courants et tensions en polarisation inverse

10. Effets optoélectroniques :

10.1. Photodiode :

Une photodiode est un type de photodétecteur capable de convertir la lumière en soit actuelle ou de tension, selon le mode de fonctionnement. La commune, traditionnelle cellule solaire utilisée pour produire de l'électricité solaire est une photodiode de large surface.

La Photodiode est similaire à une diode à semi conducteur sauf qu'elle peut être exposée soit (pour détecter les UV ou les rayons X) ou packagé avec une fenêtre ou fibre optique, connexion pour permettre à la lumière d'atteindre la partie sensible de l'appareil. Beaucoup de diodes conçues pour être utilisées spécifiquement comme photodiodes vont également utiliser une jonction PIN plutôt que le type de jonction PN de sorte que le courant d'obscurité doit être minimisé pour améliorer la sensibilité de l'appareil.

10.1.1. Principe de fonctionnement :

Une photodiode est une jonction PN ou structure PIN. Quand un photon d'énergie suffisante arrive à la diode, il excite un électron, créant ainsi un électron libre (et un trou chargé positivement). Ce mécanisme est aussi connu sous le nom d'effet photoélectrique. Si l'absorption se produit à la jonction de la région de déplétion, ou une longueur de diffusion loin de lui, ces transporteurs sont balayés de la jonction par le champ intégré de la région de déplétion. Ainsi les trous se déplacent vers l'anode et les électrons vers la cathode, et un photocourant est produit. Ce photocourant est la somme des deux : le courant d'obscurité (sans éclairage) et les courants faibles, de sorte que le courant d'obscurité doit être minimisé pour améliorer la sensibilité de l'appareil.

10.2. Mode photovoltaïque :

Lorsqu'il en mode photovoltaïque, l'écoulement de photocourant du dispositif est limité et une tension s'accumule. Ce mode exploite l'effet photovoltaïque, qui est la base de cellules solaires - en fait, une cellule solaire traditionnelle est juste une photodiode de large surface

10.2.1. L'effet photovoltaïque:

L'effet photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité (courant continu CC). Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h\nu$), si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie du gap de ce semi-conducteur ($E_g = E_C - E_V$), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction. Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement au passage des porteurs majoritaires.

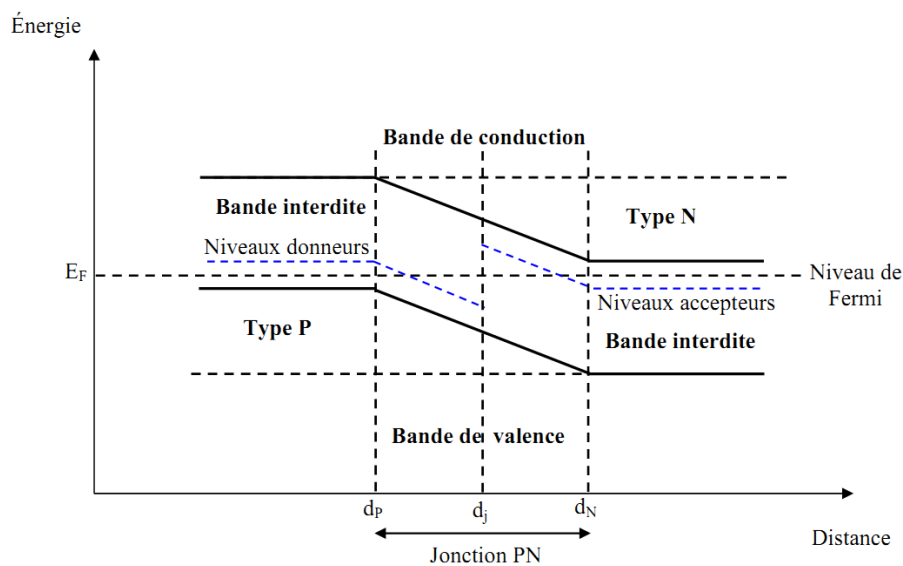


Figure I.12: Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction

Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de phonons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.

Si les photons ont une énergie inférieure à E_g ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque [7]

10.3. Effet tunnel :

L'effet tunnel désigne la propriété que possède un objet quantique de franchir une barrière de potentiel. Franchissement impossible selon la mécanique classique si l'énergie de la particule incidente est inférieure à l'énergie potentielle qu'elle doit acquérir, au détriment de son énergie cinétique, pour passer au-dessus de la barrière. Pour une telle particule, la fonction d'onde, dont le carré du module représente la densité de probabilité de présence, ne s'annule pas au niveau de la barrière, mais s'atténue à l'intérieur de la barrière, pratiquement exponentiellement pour une barrière assez large. Si, à la sortie de la barrière de potentiel, la particule possède une probabilité de présence non nulle, elle peut traverser cette barrière. Cette probabilité dépend des états accessibles de part et d'autre de la barrière ainsi que de son extension spatiale.

11. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné les notions fondamentales des semi-conducteurs, dans lesquels nous avons présenté la structure cristalline ainsi que les différents types de semi-conducteurs. Puis nous avons défini le déplacement des porteurs de charge, électrons et trous, sous l'action de différentes forces par les courants dans les semi-conducteurs. Comme nous avons donné des généralités sur l'effet photovoltaïque, dans le chapitre suivant nous présenterons les qualités électroniques ainsi que les propriétés physiques de l'alliage ternaire GaAsN.

1. Introduction :

Les matériaux semi-conducteurs III-V à base de nitrures dilués ont été étudiés de manière très détaillée depuis plus de 10 ans. Ces composés possèdent des propriétés électroniques remarquables. L'introduction d'azote en très faible quantité entraîne de profondes modifications de la structure de bande de ces matériaux, notamment une forte réduction de l'énergie de bande interdite, typiquement de l'ordre de 150 meV par pourcentage d'azote introduit. De nombreux travaux ont consisté à évaluer le potentiel de ces matériaux semi-conducteurs pour la réalisation de diodes laser ou d'amplificateurs optiques à puits quantiques réalisés sur substrats GaAs pour les bandes passantes à 1.3 μm et 1.55 μm . Une moindre sensibilité des composants à la température a été démontrée du fait des décalages de bande de conduction plus importants existants dans ces structures par rapport à celles des lasers commercialement disponibles à base de puits quantiques InGaAsP sur substrat InP. Cependant les lasers à base de puits quantiques GaAsN ou InGaAsN ont encore des performances limitées du fait de la difficulté de croissance des matériaux et en particulier le contrôle des défauts inhérents à l'introduction de l'azote dans GaAs ou InGaAs.

Ce chapitre porte sur la diminution de l'énergie de la bande interdite de l'alliage GaAsN avec l'incorporation d'azote. nous allons étudier l'influence de l'incorporation de l'azote sur les caractéristiques de la structure GaAsN/GaAs : le gap, l'énergie de transition, la contrainte, le coefficient de réflexion, l'indice de réfraction, le courant de seuil et la puissance optique émise. Le modèle d'anticroisement de bande est utilisé pour décrire de manière quantitative la diminution de l'énergie de bande interdite avec l'incorporation d'azote dans le ternaire GaAsN.

2. Incorporation de l'azote N dans GaAs :

Lorsque l'on substitue de l'azote en faible quantité à de l'arsenic dans GaAs, le caractère très électronégatif de l'atome N introduit un niveau accepteur, c'est-à-dire un piège (puits de potentiel) local pour les électrons. Ce niveau est appelé niveau isoélectronique car la valence de l'atome d'azote est identique à celle de l'atome d'arsenic. Dans GaAs : N ainsi créé, introduit un niveau d'impureté résonnant avec la bande de conduction : il se situe à environ 1.65 eV au-dessus du haut de la bande de valence, donc à 0.25 eV au-dessus du bas de la bande de conduction du GaAs, comme l'ont mis en évidence des études en pression [9].

Ce niveau, très localisé dans l'espace réel, est donc très délocalisé dans l'espace des k, d'après la relation d'Heisenberg. $\Delta x. \Delta k \geq \hbar$.

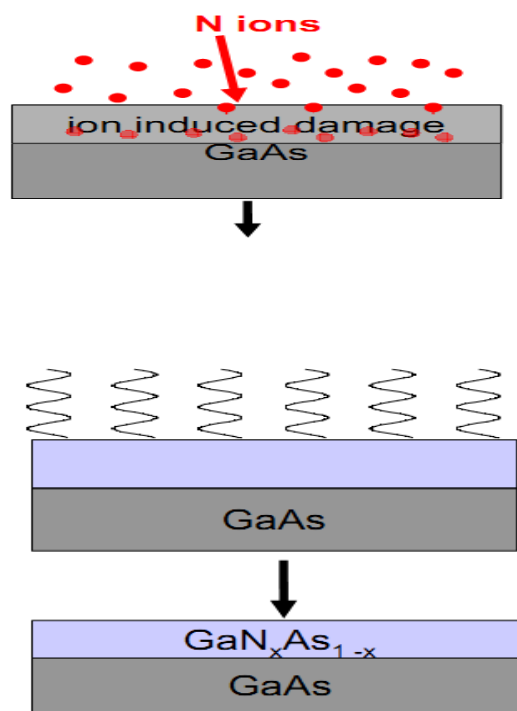


Figure II.1 : Exemple de l'incorporation de l'azote dans GaAs

3 . La structure cristalline :

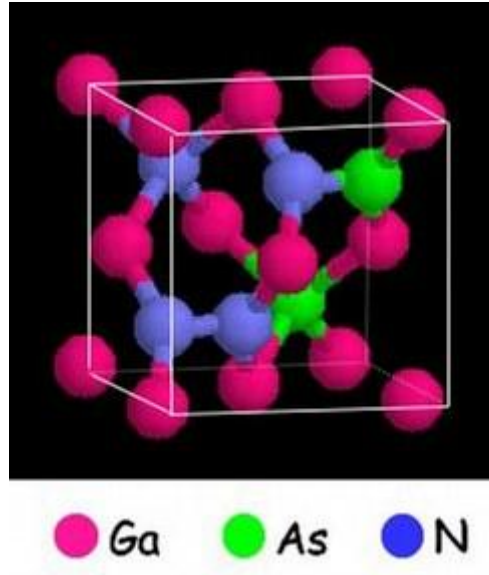


Figure II.2 : La structure cristalline de GaAsN

4. Le choix du ternaire GaAsN :

Comme on vient de le voir les composés III-V permettent de balayer une large plage de valeurs de E_g , ce qui offre la possibilité de couvrir un large spectre de longueurs d'ondes, propriété très importante du point de vue de l'optique.

Parmi les composés III-V, il y a le nitrure à faible bande interdite $GaAs_{(1-Y)}N_Y$ qui a montré de grandes potentialités dans le domaine de l'optoélectronique. Ce matériau utilise l'effet cumulé de diminution de l'énergie de la bande interdite par l'azote, ce qui autorise une grande flexibilité en terme de cette énergie et d'état de contrainte

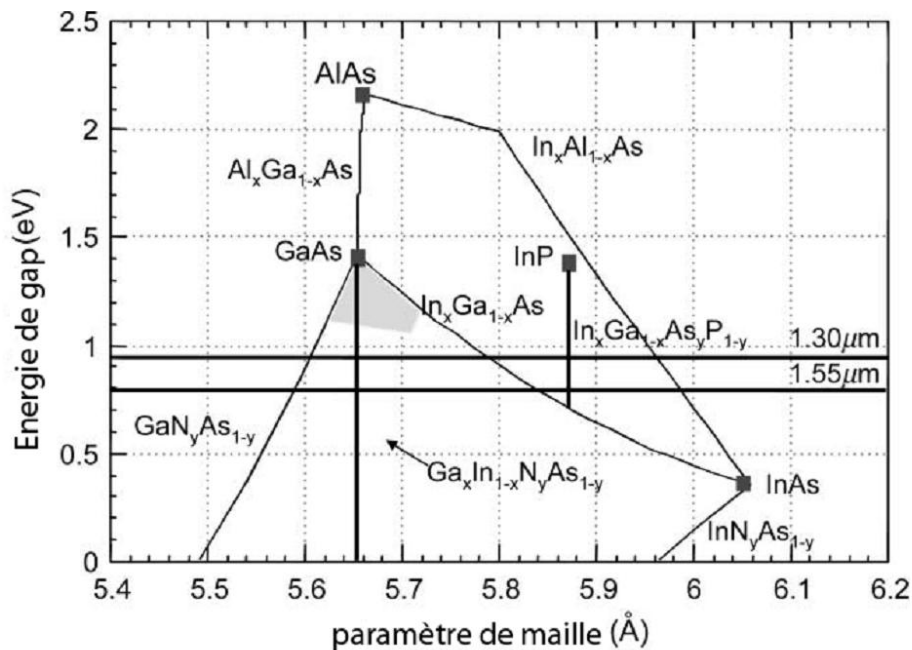


Figure II. 3 : L'énergie du gap en fonction du paramètre de maille pour les alliages V-III. Arsenic, montrant les lignes de l'accord de maille avec le GaAs et l'InP [11]

Cet alliage ternaire est aussi un bon candidat pour la réalisation de cellules solaires multi spectrales ou encore des photodiodes à avalanche à très faible courant d'obscurité et d'autres. [11]

5. Paramètres de maille :

Les paramètres cristallins, aussi appelés paramètres de maille, sont des grandeurs utilisées pour décrire la maille d'un cristal. On distingue trois longueurs a , b , c mesurés en Angström (\AA) ou nanomètres (nm) et trois angles α , β , γ , mesurés en degrés ($^\circ$), qui déterminent entièrement le parallélépipède qu'est la maille, élémentaire ou multiple. Dans le cas du réseau cubique, on ne cite qu'un paramètre de maille, a (puisque $a = b = c$, et que $\alpha = \beta = \gamma = 90$), dans le cas d'un orthorhombique, on n'en cite que trois, a , b et c (puisque $\alpha = \beta = \gamma = 90$) et dans le cas de l'hexagonal, on en cite également trois, a , c et $\gamma = 120$ (puisque $a = b$, et que $\alpha = \beta = 90$).

Le terme constant de réseau est aussi utilisé. Cependant, les paramètres cristallins d'un matériau ne sont pas des constantes : ils varient en fonction de la température, de la pression, etc. Il est pour cette raison préférable de parler de « paramètres de maille » ou « paramètres cristallins » pour décrire la maille

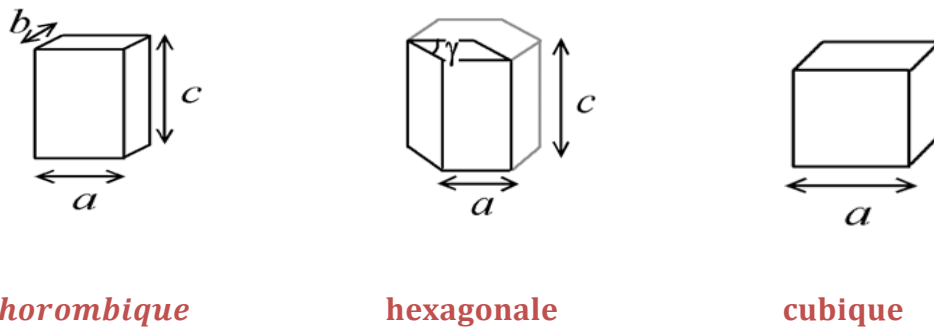


Figure II.4 : Les paramètres de maille a, b et c d'un cristal

Pour avoir Le paramètre de maille de $GaAs_{(1-y)}N_y$ on utilise la loi de Végard donnée par

$$P = a. (GaAs). (1 - y). + a. (GaN). y \quad (II. 1)$$

Nous avons tracé le paramètre de maille en fonction de paramètre de transition (l'azote) y et On voit que l'incorporation de l'azote diminue considérablement la contrainte.

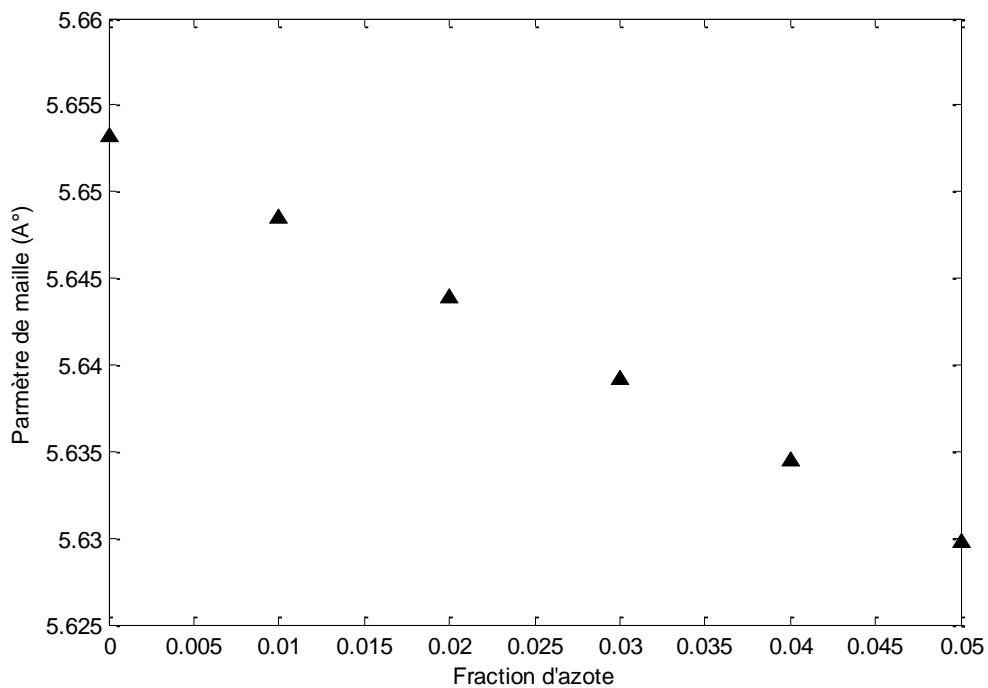


Figure II.5: Paramètre de maille en (Å), en fonction de l'azote.

Diminution de paramètre de maille avec l'augmentation de la concentration de l'azote.

6. Notion de couche contrainte (épaisseur critique) :

Comme nous le verrons plus en détail dans la suite de ce chapitre les tensions énergétiques induites par la contrainte modifient la structure des bandes des semi conducteurs. Ces changements présentent plusieurs intérêt pour la réalisation de composants pour le principal étant l'obtention de courants de seuil plus faibles que ceux obtenus avec des structures non contrainte.

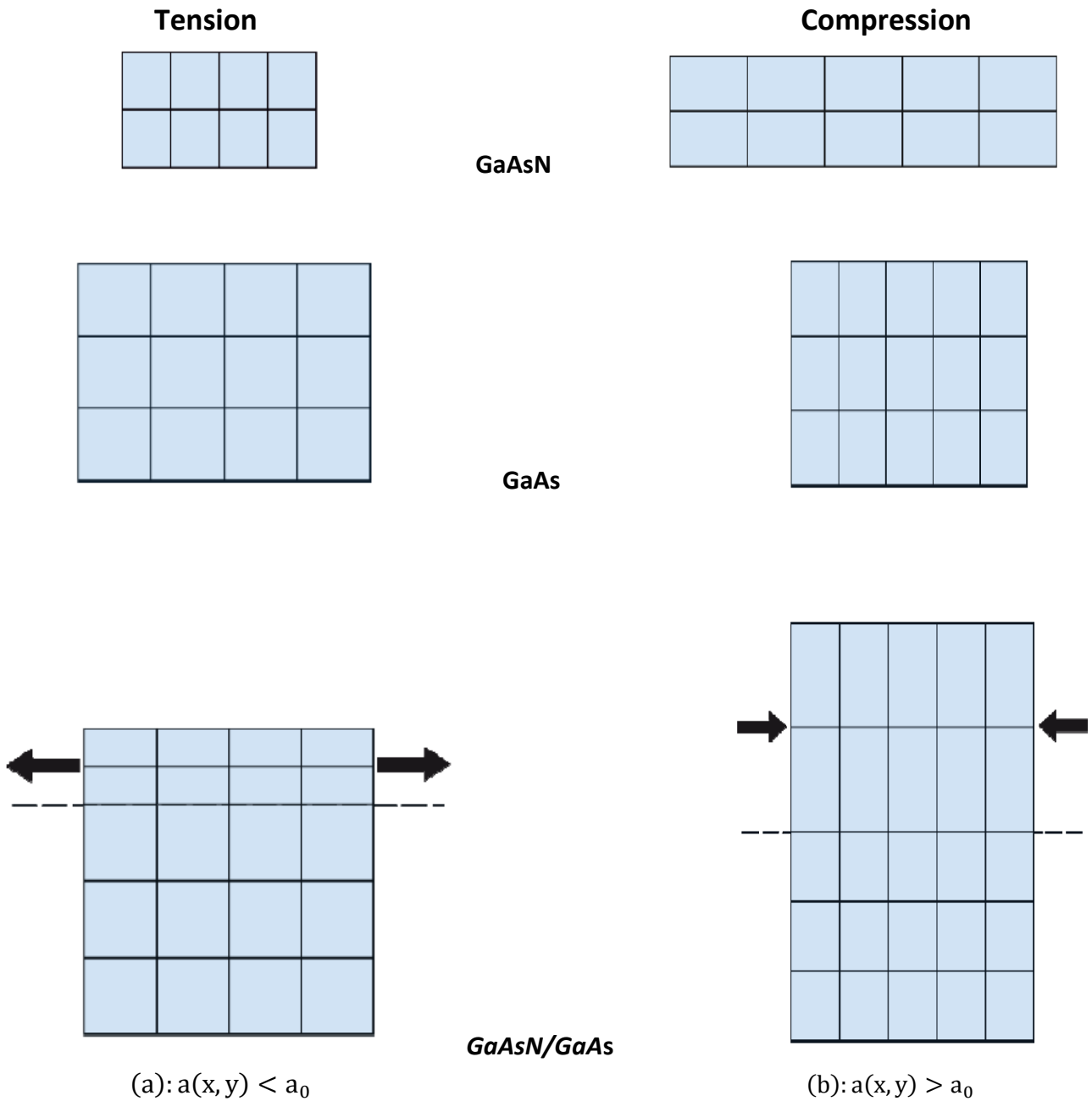


Figure II.6 : Schéma de réseau cristallin (a) : pour une couche contrainte relaxée (b) : pour une couche contrainte en compression [11]

Lorsqu'on fait croître un semi-conducteur sur un autre, et si les deux matériaux constituant le substrat et la couche active ont des paramètres de mailles différents, « évidemment ces deux matériaux doivent avoir la même structure cristalline ainsi que des paramètres de maille voisins, le matériau constituant la couche de plus grande épaisseur impose sa maille à l'autre au voisinage de l'interface. Donc, pour les couches suffisamment fines, la maille du matériau épitaxié se déforme de manière élastique dans les deux directions Parallèles ($k_{//}$) et perpendiculaire (k_{\perp}) à la surface .

Selon que le paramètre de la couche épitaxiée est plus petit ou plus grand que celui du substrat, la déformation est soit un allongement "couche en tension", soit un rétrécissement "couche en compression "

Lors de l'épitaxie d'un matériau sur un substrat de paramètre de maille différent on génère un désaccord paramétrique ; ce désaccord peut être rattrapé par deux façons différentes :

a) Dans le cas de couche épitaxiée suffisamment fine, la maille du matériau épitaxié se déforme de manière élastique de telle sorte que le paramètre de maille s'accorde au substrat dans la direction parallèle à l'interface .Dans la direction perpendiculaire a l'interface de croissance le réseau se déforme on s'allongeant ou se rétrécissant selon que le paramètre de maille de la couche est plus petit ou plus grand que celui du substrat. Dans ce cas la couche est considérée comme étant totalement contrainte.

b) Dans le cas de couche épitaxiée plus épaisses la déformation de la maille du matériau ne suffit plus à équilibrer l'énergie mécanique engendrée par la croissance. le désaccord est alors rattrapé par la génération de dislocation à l'interface de croissance.ces dislocations se propagent du substrat vers l'interface de croissance et la couche commence à relaxer.

L'épaisseur au de laquelle la couche commence à relaxer est appelée épaisseur critique. Cette épaisseur critique dépend de propriétés mécaniques du matériau

La figure 6 montre une représentation de la maille d'un matériau contraint en compression, (b) pour une couche isolée, (c) pour un puits quantique. Comme on peut le voir sur cette figure dans le cas d'un puits quantique la contrainte engendrée par la croissance se répartie entre les deux interfaces alors que pour un système comportant une couche isolée toute la contrainte s'applique sur une seule interface.

Dans chacun de ces cas une épaisseur critique LC peut être définie. Plusieurs auteurs ont proposé des modèles permettant le calcul des épaisseurs critiques. Matthews [10] et Blakeslee, en particulier, ont élaboré un modèle basé sur l'équilibre des forces à l'interface de Croissance. D'autres auteurs tels que Pease [16] et Bean définissent l'épaisseur critique comme étant celle qui correspond au moment où l'énergie de contrainte élastique emmagasinée par la couche, qui croît proportionnellement à l'épaisseur de la couche, devient égale à l'énergie du système (couche relaxée + réseau de dislocations de rattrapage du paramètre de maille). La couche contrainte est thermo dynamiquement stable pour $L < LC$.

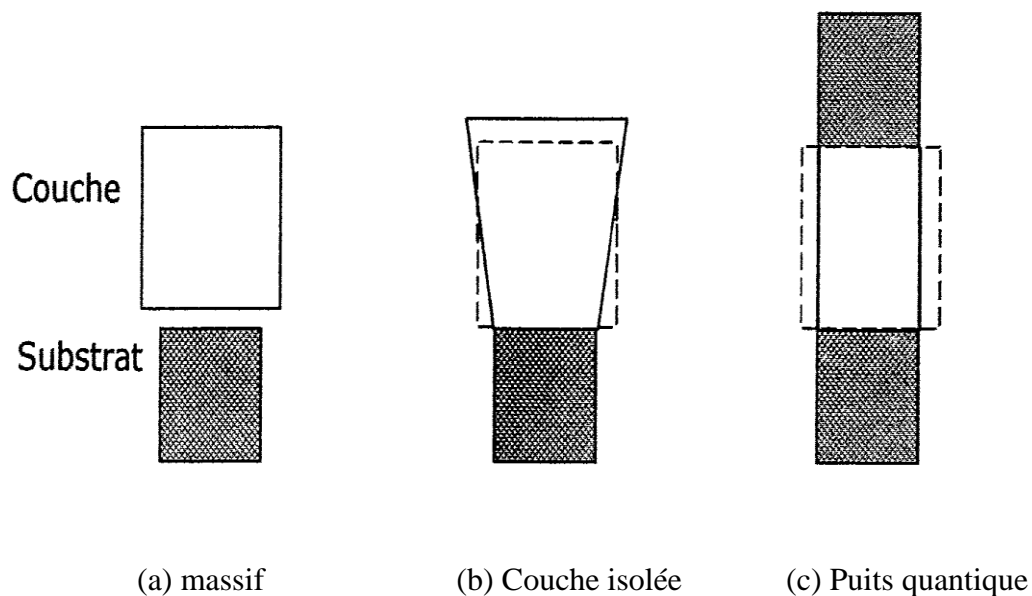


Figure II. 7 : Vu schématique, (a) d'une cellule couche et cellule substrat isolées (b) d'une couche unique contrainte en compression (c) d'un puits quantique.

Pour calculer les épaisseurs critiques nous avons choisi d'utiliser les deux modèles :

- le premier est proposé par Matthews [10] et Blakeslee

$$L(x,y) = \frac{a(x,y)}{K\sqrt{2} \pi f} \frac{(1-0.25\gamma)}{(1+\gamma)} \left(\ln \frac{L\sqrt{2}}{a(x,y)} + 1 \right) \quad (\text{II. 2})$$

Expression dans laquelle a est le paramètre de maille de la couche relaxée, $a(0)$ celui du substrat, et f est le désaccord paramétrique défini par :

$$f = \frac{a// - a}{a} \quad (\text{II. 3})$$

Et γ est le coefficient de pression donné par

$$\gamma = \frac{c_{12}}{c_{11} + c_{12}} \quad (\text{II. 4})$$

Où c sont les coefficients élastiques. le coefficient k est égal à 1 dans le cas d'un super réseau ; il est égal à 2 pour un puit quantique et à 4 pour une couche unique

- le deuxième est proposé par People[22] et Bean

$$L(x,y) = \frac{a(x,y)}{32K\sqrt{2}\pi f^2} \frac{(1-\gamma)}{(1+\gamma)} \left(\ln \frac{L\sqrt{2}}{a(x,y)} \right) \quad (\text{II. 5})$$

Nous avons tracé la variation de la contrainte en fonction de l'azote et on voit que la contrainte augmente avec l'augmentation de l'azote comme le montre la figure 8 :

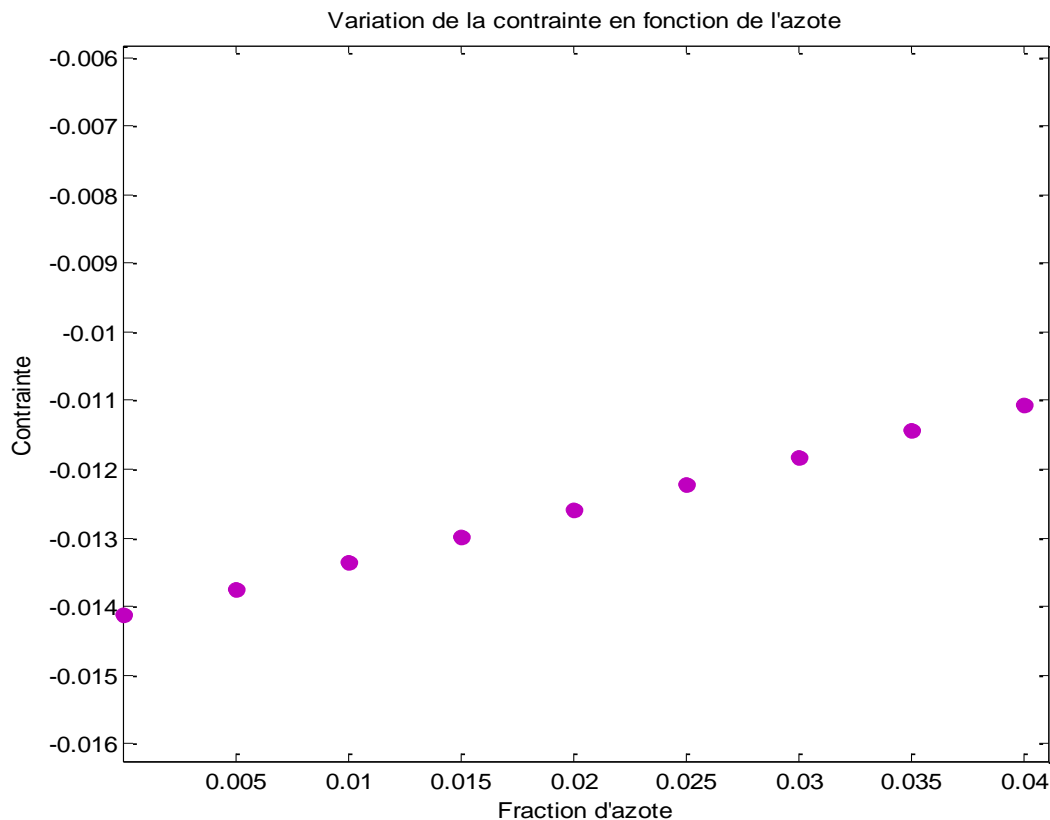


Figure II.8 : L'effet de l'azote sur la contrainte

La courbe est croissante : à chaque fois que la concentration de L'azote augmente la contrainte diminue.

7. la bande interdite :

C'est la bande d'énergie séparant la bande de valence de la bande de conduction des semi-conducteurs ; et suivant le Gap. Les matériaux semi conducteurs se divisent en deux types :

7.1. Gap direct : la bande de conduction est uni-vallée en $k=0$ et la dispersion d'énergie $E(k)$ est non parabolique : les transitions sont verticales

7.2. Gap indirect : la bande de conduction est multi-vallée et anisotrope avec plusieurs minimas équivalents situés en différents points de la zone de Brillouin, les surfaces d'énergie constante au voisinage des minimas k_0 sont des ellipsoïdes, et les transitions sont des obliques.

Pour la réalisation des composants optoélectroniques les matériaux d'intérêt sont à Gap directe

Plusieurs paramètres de l'alliage GaAsN peuvent être déterminés par interpolation linéaire des paramètres parents binaire le i de constituant, utilisant ainsi la loi Végard mais cette relation générale ne peut s'appliquer pour la détermination du gap de ce ternaire. [11]

IL a été montré par mesure de spectroscopie qu'à partir d'un certain pourcentage d'azote le gap se divise en deux sous-bandes et plus la concentration de l'azote augmente plus les deux sous-bandes s'éloignent l'une de l'autre. le calcul utilisant le modèle de BAC donne les expressions suivantes :

$$E_{\pm}(K) = \frac{1}{2} (E_N + E_M(K) \pm \sqrt{(E_N - E_M(k))^2 + 4(V_{MN})^2 \cdot Y}) \quad (\text{II.6})$$

Où E_N est le niveau de l'atome d'azote isolé, $E_M(k)$ est l'énergie de la bande de conduction Γ du GaAs, et V_{MN} décrit l'interaction entre ces deux types d'état. Cette interaction est d'autant plus forte que le nombre d'atome d'azote dans la matrice GaAsN est élevé ; il a été montré que :

$$V_{MN} = A_{MN} \cdot \sqrt{y}$$

$$A_{MN} = 2.7$$

$$E_N = 1.52 - 3.9y$$

Où : y est la fraction d'azote et A_{MN} est une constante. A partir de ce résultat (équation (II.6)), on peut comprendre que la bande de conduction et à cause de l'interaction de E_M avec E_N se divisent en deux sous-bandes non paraboliques $E_-(k)$ et $E_+(k)$ dont l'énergie dépend de la concentration d'azote. Plus la concentration d'azote augmente plus les deux sous-niveaux se repoussent et donc plus le minimum de la bande de conduction $E_-(K)$ de l'alliage formé diminue, et ceci mène vers une réduction de la bande interdite, que nous allons voir par la suite.

8. Détermination de la bande interdite

$$E_{g,ABC}(y) = y \cdot E_{g,AB} + (1-y) \cdot E_{g,AC} - b \cdot y \cdot (1-y) \quad (\text{II.7})$$

On trace la variation du gap en fonction de la variation de l'azote et on voit que l'azote a un effet de diminuer le gap comme le montre la figure suivante :

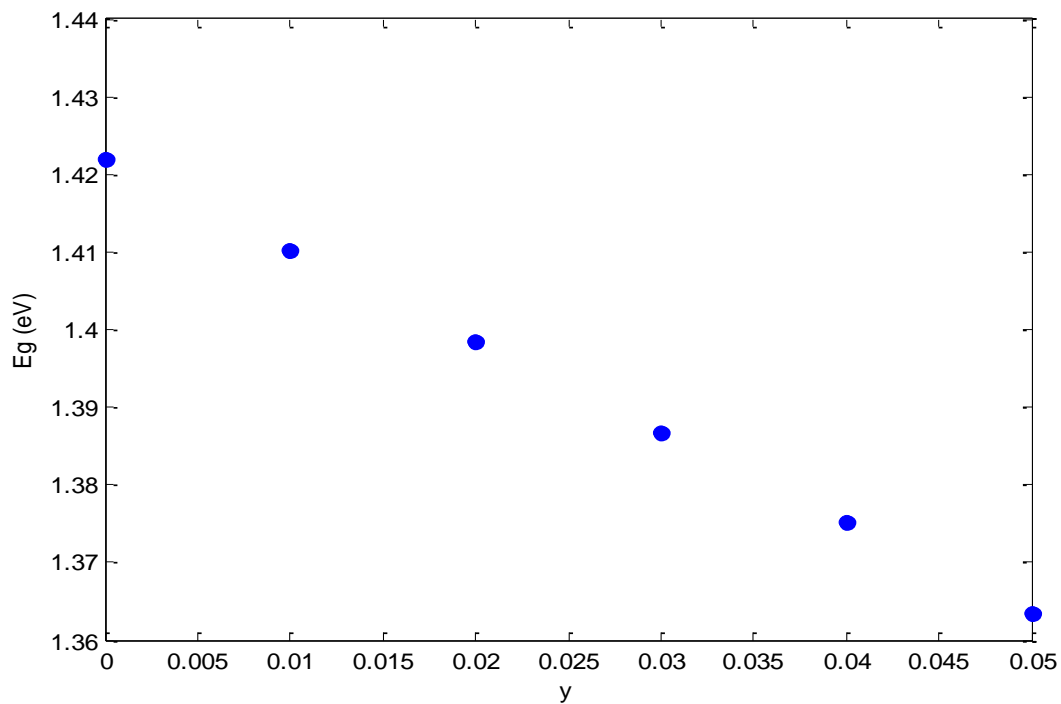


Figure II.9 : La variation de l'énergie de la bande interdite gap en fonction de l'azote

Diminution de l'énergie de bande interdite de GaAsN avec l'augmentation de la concentration d'azote

8.1 Effet de la contrainte sur la bande interdite

Pour la description du role de la contrainte sur la structure de bandes nous avons appliqué le modèle de van de walle [17] et utilisé le formalisme de krijn [18]

Les deux composantes parallèle et perpendiculaire du tenseur de déformation peuvent être définies de la manière suivante

$$\epsilon_{//} = \frac{a_{//} - a}{a} \tag{II. 8}$$

$$\epsilon_{\perp} = \frac{a_{\perp} - a}{a} \tag{II. 9}$$

pour une structure totalement contrainte :

$$a_{//} = a$$

$$\epsilon_{\perp} = -2 \frac{c_{12}}{c_{11}} \epsilon_{//} \tag{II. 10}$$

Le rôle de la contrainte biaxiale sur la structure de bandes de la couche épitaxiée est schématisé sur la(figure 10),celle-ci présente la structure de bandes d'un semi conducteur a gap direct en l'absence de contrainte (figure 7.a) ,soumis a une compression biaxiale (figure 7.b) et soumis à une contrainte biaxiale de tension (figure 7.c).

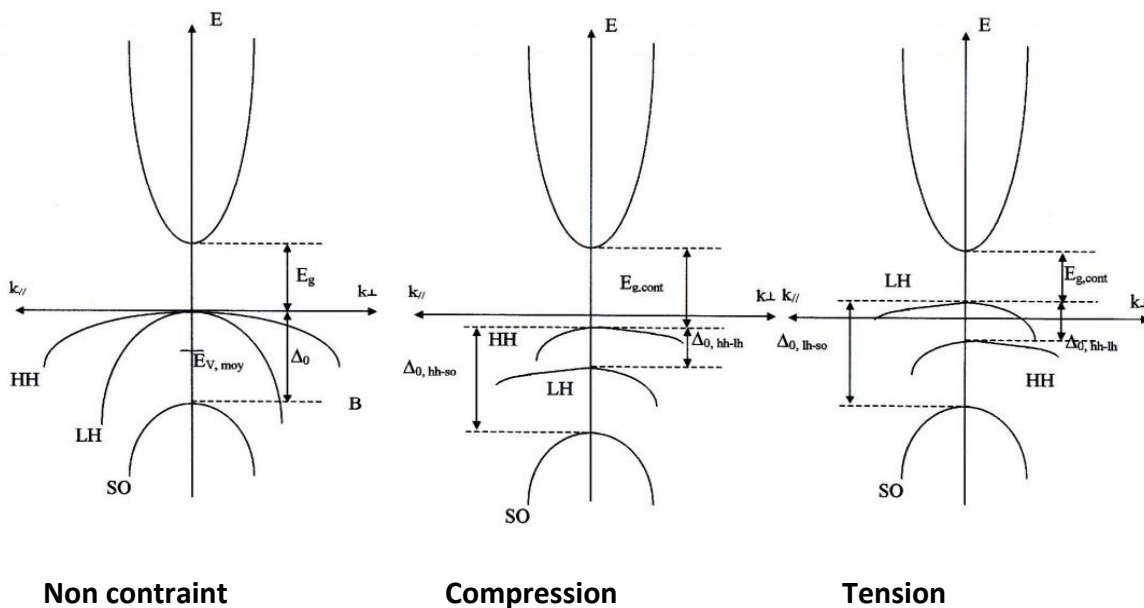


Figure II.10 : Structure de bande d'un semi-conducteur a gap direct a) non contraint ; b) en compression; c)en tension

On voit que l'incorporation de l'azote diminue considérablement le gap contraint comme le montre la figure suivante :

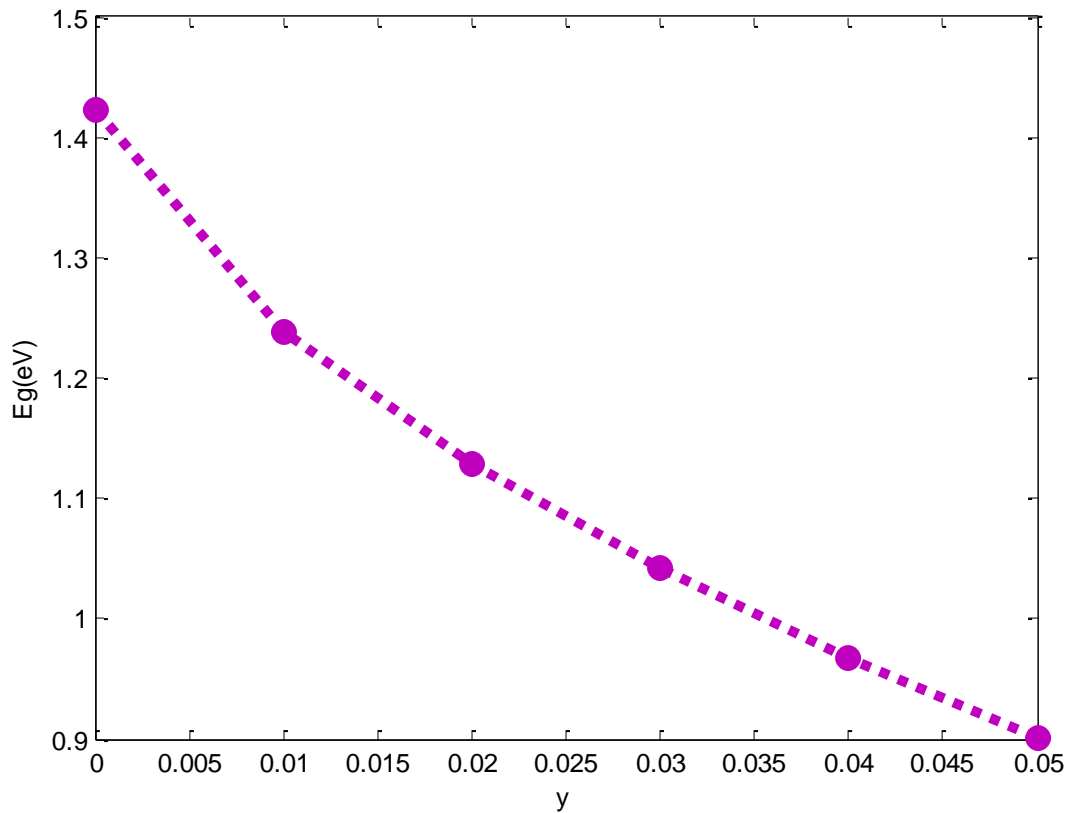


Figure II.11 : Gap contraint

8.2 Effet de la température sur la bande interdite :

Les mesures expérimentales montrent que l'énergie du Gap varie avec la température, ceci est expliqué par le changement du paramètre de maille.

Pour déterminer cette variation, l'approximation de varshni est souvent utilisée

$$E_g(t) = E_g(0) - \frac{A \cdot T^2}{B+T} \quad (\text{II.11})$$

Avec A, B paramètres empiriques de varshni donnés par la table (2.1) pour les différentes direction Γ , X et L

Paramètre Unité	E_g^Γ (eV)	E_g^X (eV)	E_g^L (eV)	A^Γ (meV/K)	B^Γ (K)	A^X (meV/K)	B^X (K)	A^L (meV/K)	B^L (K)
Si	4.34	1.1557		0.391	125	0.7021	1108		
Ge	0.8893		0.741	0.6842	398			0.4561	210
GaAs	1.519	1.981	1.815	0.5405	204	0.46	204	0.605	204
InP	1.4236	2.384	2.014	0.363	162			0.363	162
AlAs	3.099	2.24	2.46	0.885	530	0.70	530	0.605	204
GaSb	0.812	1.141	0.875	0.417	140	0.475	94	0.597	140
AlSb	2.386	1.696	2.329	0.42	140	0.39	140	0.58	140
InAs	0.417	1.433	1.133	0.276	93	0.276	93	0.276	93
GaP	2.886	2.35	2.72			0.5771	372	0.5771	372
AlP	3.63	2.52	3.57	0.5771	372	0.318	588	0.318	588
InSb	0.235	0.63	0.93	0.32		170			

Tableau II. 1: L'énergie de gap et les paramètres de varshni des principaux semi-conducteurs à $t = 0$ au voisinage des points Γ, X, L .

On trace E_g en fonction de la température(T) pour différentes valeurs de y et on voit que E_g diminue avec la température comme le montre la figure suivantes :

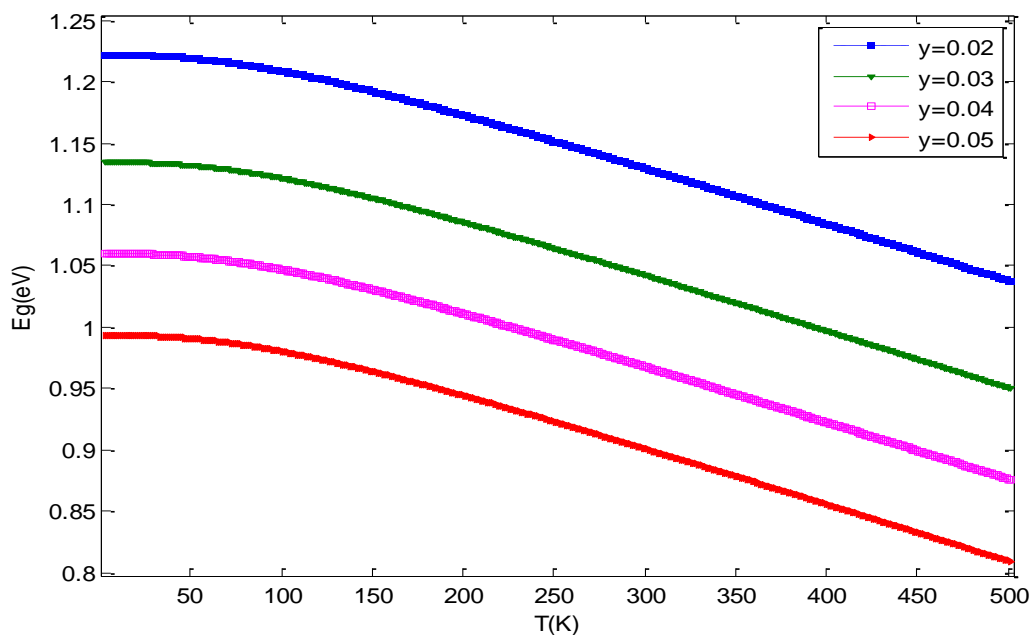


Figure II. 12 : La variation de l'énergie de la bande interdite gap en fonction de la température.

L'augmentation de la température et l'incorporation de l'azote fait diminuer l'énergie du Gap

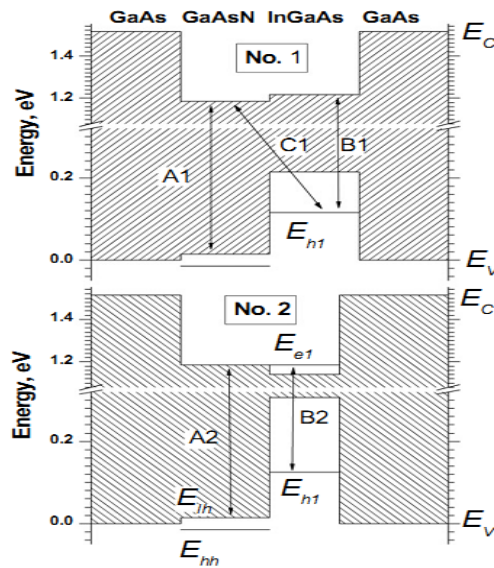


Figure II.13 : Le diagramme d'énergie du GaAs / GaAsN / InGaAs hétérostructures.

E_C est la limite de la bande de conduction. E_V est la bande de valence.

E_{h1} ; E_{e1} sont les niveaux de la taille de l'état fondamental quantification pour les trous et les électrons dans InGaAs.

E_{h1} et E_{hh} sont la lumière trous et de gros trous extrémités de la bande de valence dans GaAsN.

9. Calcul de l'énergie de transition :

L'énergie de recombinaison électrons-trous lourds est donnée par :

$$E_{tr} = E_g^C + E_{n,e} + E_{n,hh} \quad (II.12)$$

La question qui se pose c'est quel niveau de quantification il faut prendre en Compte ? Les mesures de photoluminescence montrent que les recombinaisons radiatives se font essentiellement entre le premier niveau d'électrons et le premier des trous lourds, comme illustré dans le schéma de la figure 14 : [12]

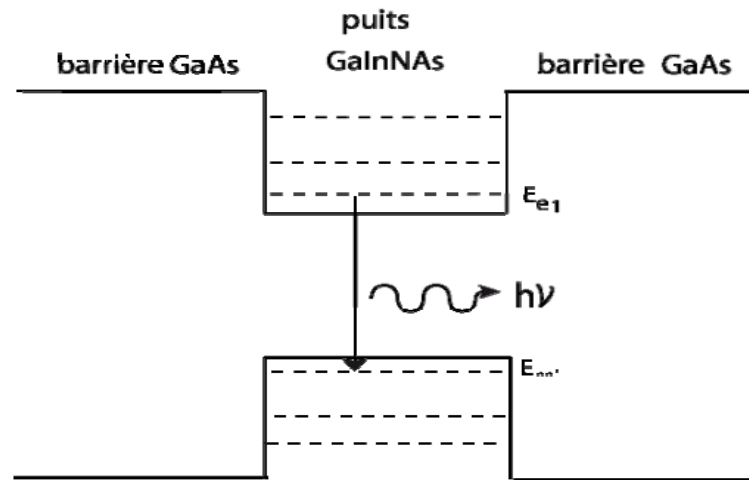


Figure II.14 : Schéma des transitions radiatives entre l'état minimal de la bande de conduction et l'état maximal de la bande de valence

Dans le but d'illustrer l'effet de l'azote sur l'énergie de transition nous avons représenté sur la figure 13 l'énergie de transition en fonction de l'azote et on voit que l'azote a pour effet de diminuer l'énergie de transition comme le montre la figure suivante :

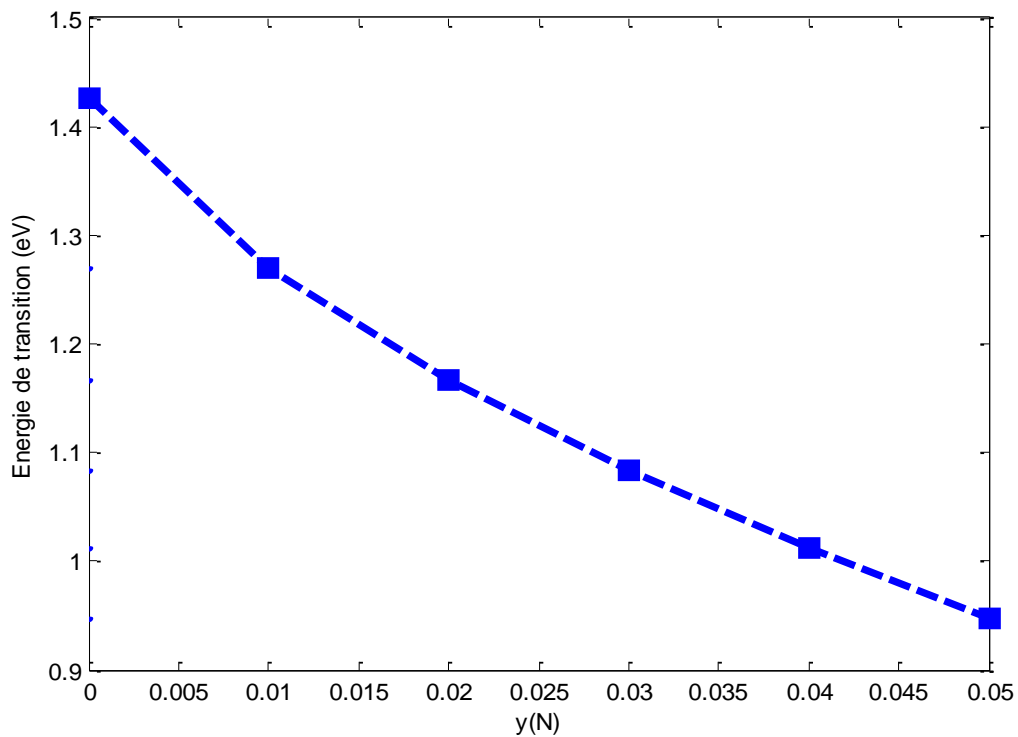


Figure II.15: L'effet de l'azote sur l'énergie de transition
L'incorporation de l'azote fait diminuer l'énergie de transition.

10. Absorption :

Les états électroniques étant connus, on peut alors calculer le gain matériau. Il s'agit d'évaluer le rapport entre le nombre net de photons et le nombre de photons injectés dans la zone active du composant. Quand on utilise les semi conducteurs pour les lasers ou les amplificateurs optiques, il faut pouvoir évaluer les phénomènes schématisés sur la figure 1.6, à savoir:

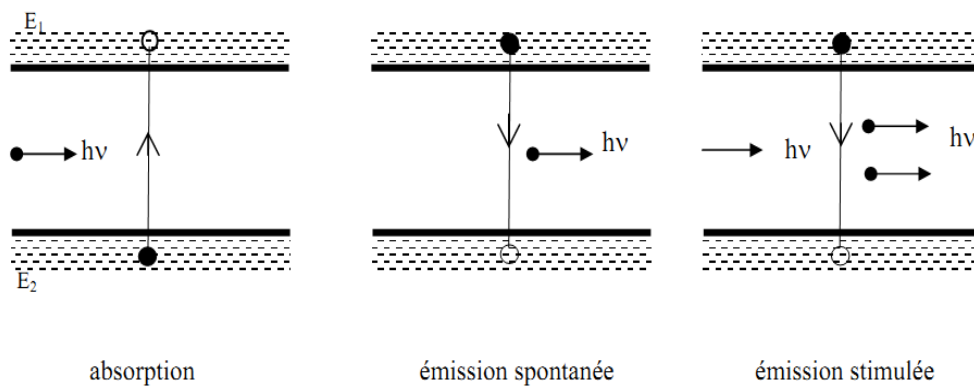


Figure II 16 : Schéma des transitions radiatives entre un état de la bande de valence et un état de la bande de conduction [9]

- l'absorption où l'énergie $h\nu$ d'un photon est utilisée pour permettre à un électron de passer d'un état E_2 de la bande de valence vers un état vide E_1 de la bande de conduction tels que : $E_1 - E_2 = h\nu$
- l'émission spontanée où un électron passe d'un état E_1 de la bande de conduction vers un vide E_2 de la bande de valence en émettant un photon d'énergie : $E_1 - E_2 = h\nu$
- l'émission stimulée où un photon d'énergie $h\nu$ vient interagir avec le semi conducteur et favoriser le passage d'un électron d'un état E_1 de la bande de conduction vers un état vide E_2 de la bande de valence en émettant un deuxième photon identique au premier. [9]

10.1 Détermination de l'absorption :

$$\alpha = \alpha_0 \frac{\sqrt{E-E_g}}{E} \quad (II.13)$$

E_g : Energie du gap

E : Energie du photon

$$\alpha_0 = 6.10^4 \text{ cm}^{-1}$$

On prend plusieurs valeurs de l'azote (y) et on trace la courbe de la variation de l'absorption en fonction de la longueur d'onde avec plusieurs valeurs de y :

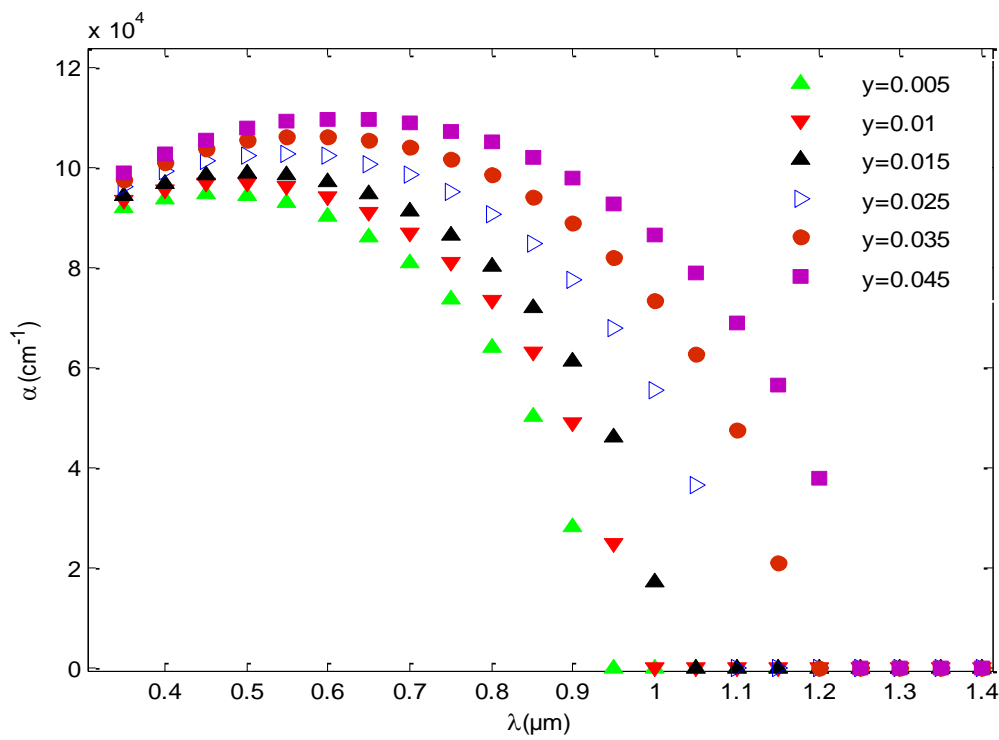


Figure II.18: Variation d'absorption en fonction de la longueur d'onde

On prend plusieurs valeurs de y et on trace la variation de alpha en fonction de l'énergie :

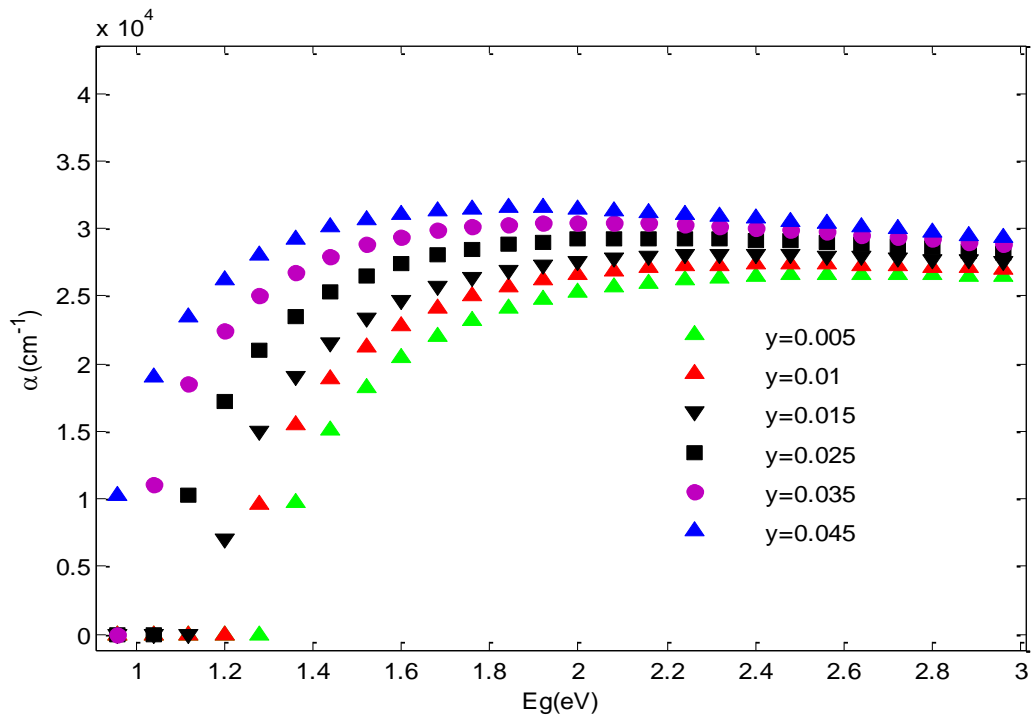


Figure II.20 : Le coefficient d'absorption alpha en fonction de la bande d'énergie E_g

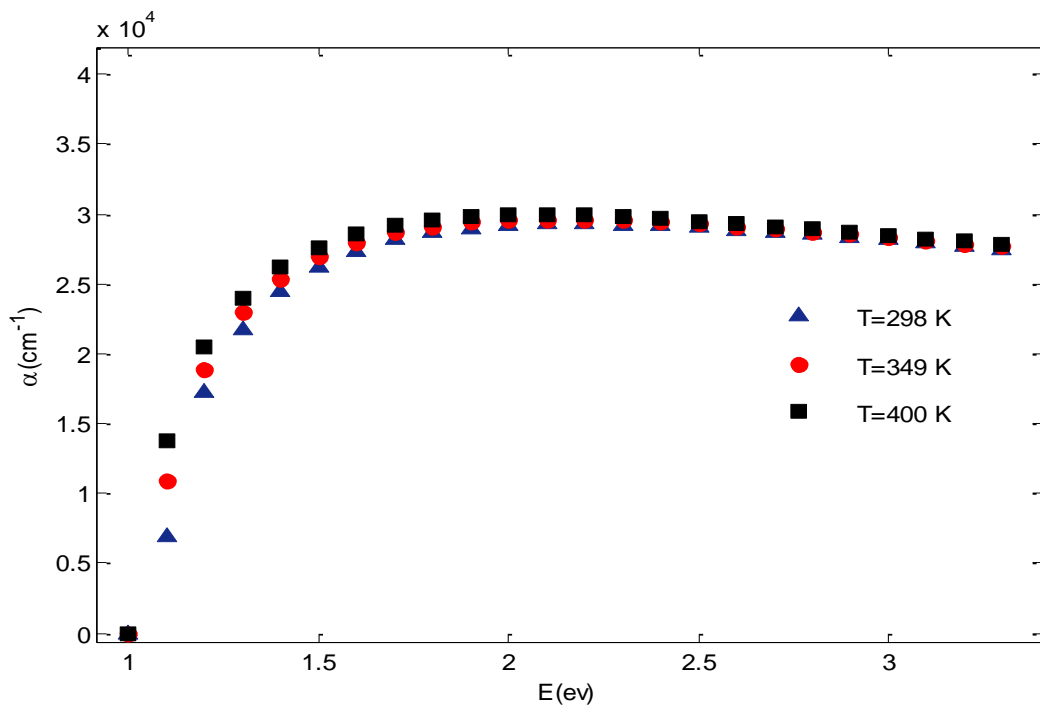


Figure II.21 : Coefficient d'absorption alpha en fonction de l'énergie du photon pour $y=0.025$

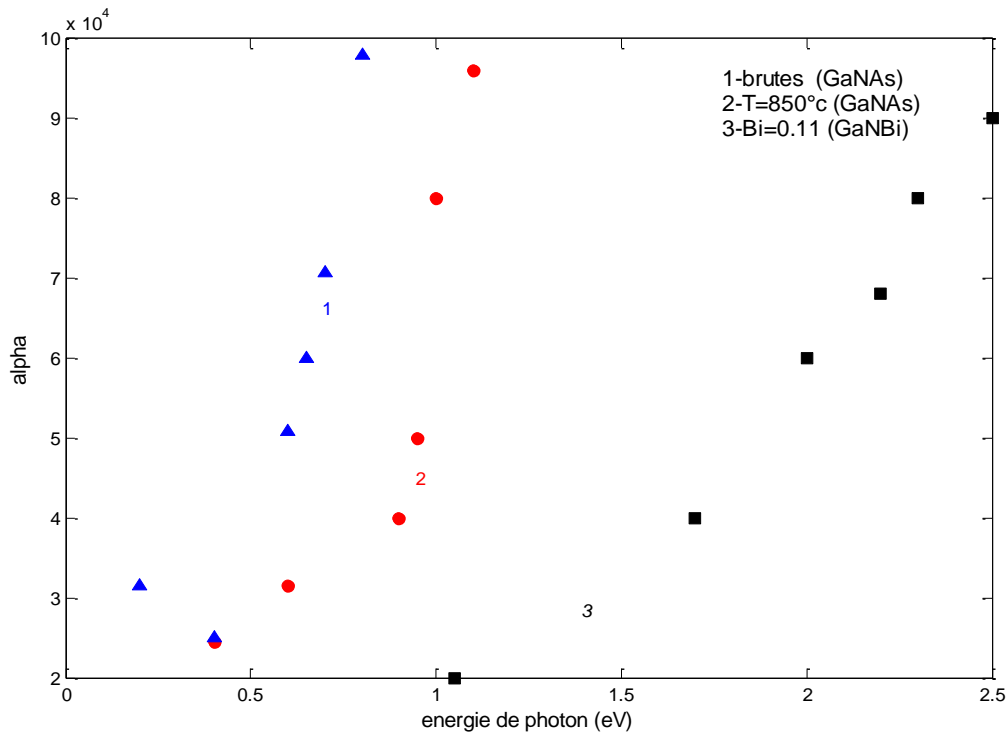


Figure II.22 : Variation de l'absorption en fonction de l'énergie de photon pour (1) et (2)GaAsn(3)GaNBi

Les résultats obtenus à la simulation sont acceptables par rapport à ceux de la théorie, telles qu'on remarque une forte augmentation de coefficient d'absorption en fonction de l'énergie du photon

10.2 Augmentation singulière du coefficient d'absorption avec l'incorporation d'azote dans les alliages GaAsN et GaInAsN :

L'influence mutuelle de l'azote sur les propriétés d'absorption dans le GaAsN n'a pas été étudiée. Afin d'approfondir la compréhension de ces propriétés, nous comparons l'évolution du coefficient d'absorption au seuil en fonction de la teneur en azote obtenue pour le GaAsN et le GaInAsN. Une faible augmentation du coefficient d'absorption au seuil est observée dans chaque alliage lorsque la teneur en azote s'accroît. Nous montrons que cette évolution est opposée à ce qui est observé dans le GaAs et le GaInAs, à titre de comparaison, et dans plusieurs alliages III-V courants. Par ailleurs, les valeurs mesurées du coefficient d'absorption au seuil sont comparées à un modèle qui incorpore la description du modèle BAC de la masse effective électronique à la théorie k.p et qui néglige les effets de l'azote sur les bandes de valence.[17]

11. Indice de réfraction :

11.1 Détermination des indices de réfraction dans le matériau massif :

La variation des indices de réfraction des matériaux semi conducteurs massifs sans le gap a été évaluée selon la formule de sellmeier :

$$n^2 = \alpha + \frac{\beta\lambda^2}{\lambda^2 - \gamma} \quad (\text{II.14})$$

Avec λ en μm

Pour les principaux binaires les constantes α , β , et γ sont données dans le tableau ci-dessous :

Binaire	α	β	γ
GaAs	8.85	2.054	0.39
GaP	4.54	4.31	0.22
InAs	7.79	4.00	0.25
InP	7.225	2.316	0.392
AlAs	2.015	6.147	0.079

Tableau II.2 : Des coefficients de sellmeier pour les principaux binaires III.V

Les indices de réfraction pour les ternaires sont ensuite calculés à partir des binaires selon des lois de type vegard Ternaire de type $A B_x C_{(1-x)}$

$$n_{ABC}^2 = Xn_{AB}^2 + (1 - x) n_{AC}^2 \quad (\text{II.15})$$

11.2 Détermination des indices de réfraction dans le matériau à puits quantique :

Pour prendre en compte l'effet du confinement quantique sur l'indice de réfraction nous avons choisis le modèle de tagaki qui présente l'avantage d'être très général

La variation de l'indice de réfraction dans le puits en fonction de la longueur d'onde est montrée sur la figure suivante :

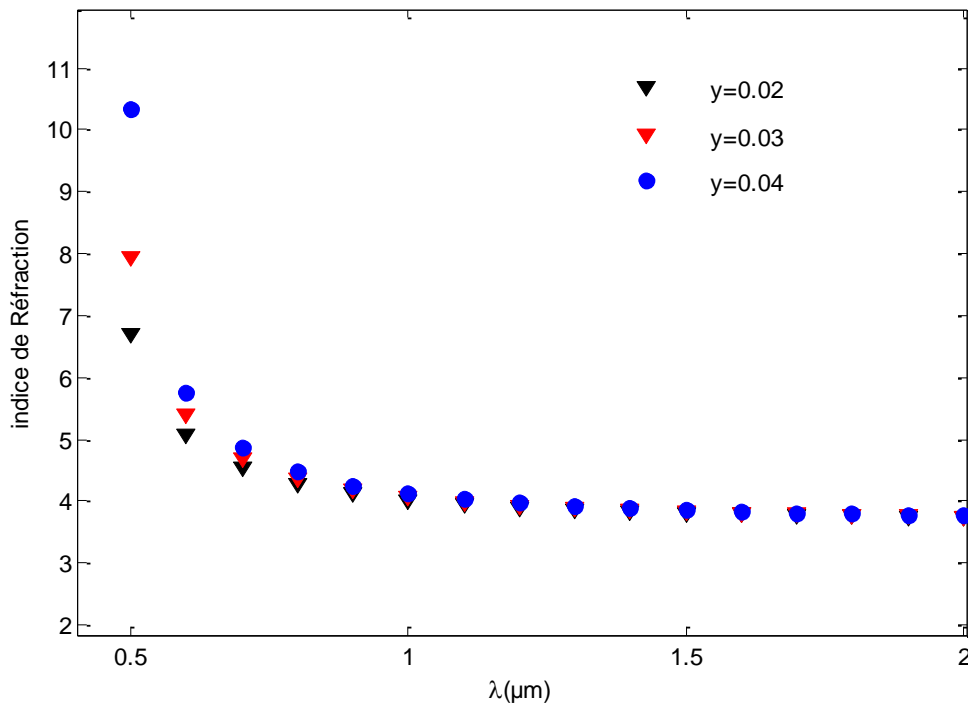


Figure II.23 : Variation de l’indice de réfraction dans le puits en fonction de la longueur d’onde pour différentes valeurs de l’azote (Y)

L’incorporation de l’azote (y) fait augmenter l’indice de réfraction par contre l’augmentation de la longueur d’onde le fait diminuer

12. Indice de réflexion :

La réflexion est le changement de direction d'un front d'onde à une interface entre deux différents milieux afin que les déclarations de front d'onde dans le milieu dont il est issu. Les exemples communs incluent le reflet de la lumière , du son et des vagues d'eau . La loi de la réflexion, dit que, pour la réflexion spéculaire l'angle sous lequel l'onde est incidente sur la surface est égal à l'angle sous lequel il se reflète :Miroirs spéculaire ,réflexion, exposition

L’indice de réflexion est défini par la formule suivante :

$$R = \left(\frac{1-n}{1+n}\right)^2 \quad (II. 18)$$

n : indice de réfraction.

On prend différentes valeurs de l'azote (Y) et on trace la variation de l'indice de réflexion dans le puits en fonction de la longueur d'onde on obtient le résultat suivant :

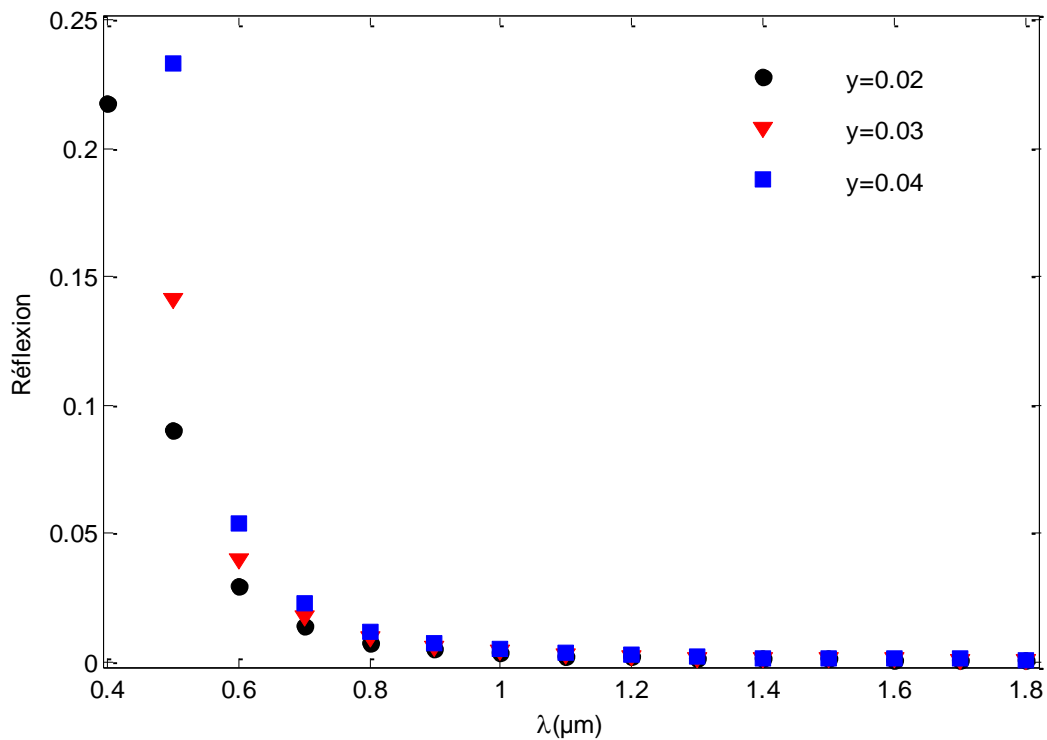


Figure 24 : Variation de l'indice de réflexion dans le puits en fonction de la longueur d'onde pour différentes valeurs de y

L'augmentation de la longueur d'onde fait diminuer l'indice de réflexion dans le puits pour différentes valeurs de y

Dans la figure suivante On trace la variation de l'indice de réflexion dans l'air pour différentes valeurs de y on obtient le sur:

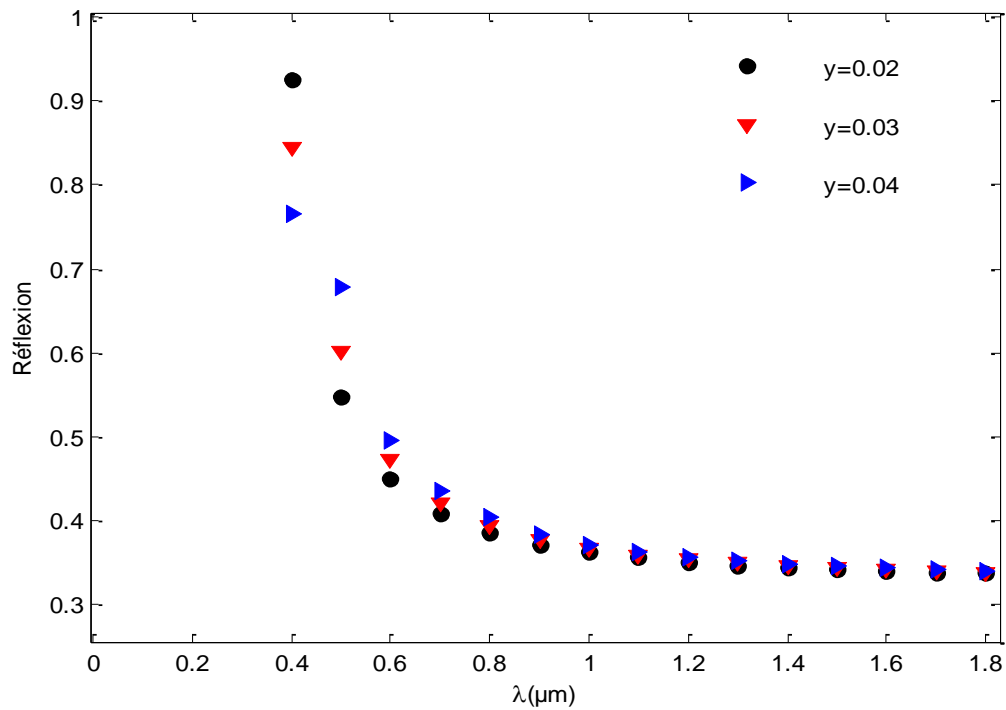


Figure II.25 : Variation de l'indice de réflexion dans l'air en fonction de la longueur d'onde.

L'augmentation de la longueur d'onde fait diminuer l'indice de réflexion dans l'air pour différentes valeurs de y

13. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié les propriétés très particulières de nitrures d'éléments III.V GaAsN. Nous avons aussi étudié l'effet de l'incorporation de l'azote sur les paramètres de maille, et déterminé le gap et ses effets sur la contrainte, la température et nous avons également étudié l'absorption de la lumière, l'énergie de transition, l'indice de réflexion ainsi que l'indice de réfraction

1. Introduction :

De tout temps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil, étoile la plus proche de la terre. La plupart des utilisations, connues depuis des siècles, sont directes comme en agriculture à travers la photosynthèse ou dans les diverses applications de séchage et chauffage autant artisanales qu'industrielles.

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et malgré une atténuation importante lorsqu'elle traverse l'atmosphère, la quantité qui reste est encore assez importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 10 000 w/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 14 000 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée. Signalons dès à présent le que le flux solaire reçu au niveau de sol dépend de :

- l'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre,
- l'attitude du lieu de collecte, son degré de pollution ainsi que son altitude,
- la période de l'année,
- l'instant considéré dans la journée,
- la nature des couches nuageuses.

Ainsi, il existe dans le monde des zones plus favorisées que d'autres, du point de vue ensoleillement, répertoriées sous forme d'atlas et mettant en évidence des "gisements solaires".[1].

Pour comprendre le fonctionnement de cette énergie et optimiser son utilisation, nous effectuons dans ce chapitre un bref rappel des principales relations sur les cellules solaires et quelques notions sur ces divers types, ainsi que les caractéristiques

$I = f(V), P = f(I)$, facteur de suffisance et le rendement de conversion

2. La cellule solaire :

La cellule solaire est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par un processus appelé « effet photovoltaïque ». La structure la plus simple d'une cellule solaire comporte une jonction entre deux zones dopées différemment, un semi conducteur de type N (les électrons sont majoritaires et les trous minoritaires) et un semi conducteur de type P (les trous qui sont majoritaires et les électrons sont minoritaires) séparés par une zone de charge d'espace (ou zone de transition) d'un même matériau (homo jonction P-N) ou entre deux matériaux (hétéro jonction). Les cellules sont présentées sous forme circulaire (diamètre 10cm) ou carrée (coté 10 cm). [7]

2.1. Les différents types de cellules solaires [13]:

Il existe trois types principaux de cellules :

2.1.1. Les cellules mono- cristallines :

La cellule monocristalline s'approche le plus du modèle théorique: cette cellule est effectivement composée d'un seul cristal divisé en deux couches. Les cellules monocristallines permettent d'obtenir de hauts rendements, de l'ordre de 15 à 22 %. Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients suivants:

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).

2.1.2. Les cellules poly-cristallines :

Les cellules poly-cristallines sont composées d'un agglomérat de cristaux. Elles aussi proviennent du sciage de blocs de cristaux, mais ces blocs sont coulés et sont dès lors hétérogènes. Les cellules poly- cristallines sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevé.
- Nécessitent moins d'énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en laboratoire.

2.1.3. Les cellules amorphes :

Le silicium amorphe, apparu en 1976. A une structure atomique désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption, il le perd en mobilité des charges électriques (rendement de conversion faible).

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 5 % par module et de 14 % au laboratoire.
- Fonctionne sous très faible éclaircissement.

Grâce à la technologie de nouveaux matériaux le tellure de cadmium (CdTe), l'arséniure de gallium (GaAs) ainsi que le diséléniure de cuivre et d'indium (CIS) ont permis d'obtenir des photopiles ayant des rendements de 38 % au laboratoire.

2.2. Structure classique d'une cellule solaire:

D'après les arguments détaillés ci-dessus une cellule solaire doit vérifier les critères de base suivants:

- Les spectres du matériau absorbant doit être capable de piéger le photon incident et ainsi créer paire électron - trou Pour que cela soit possible il faut que le gap d'énergie de ce matériau E_g puisse s'écrire: $E_g = h\nu_{inc}$ Pour qu'il ait une efficacité dans la conversion photovoltaïque il faut que E_g coïncide avec Le maximum du spectre solaire.
- Cette énergie doit être convertie en énergie électrique, pas en chaleur. Elle doit être transférée à paire électron -trou sous forme d'énergie potentielle.
- Il faut que les porteurs ainsi générés ne se recombinent pas à nouveau, pour cela ils doivent être collectés en direction des électrodes de sorties de la cellule.
- La structure de collecte la plus simple est un champ électrique interne. Celui ci est toujours associé à une barrière de potentiel ($E = -\text{grad } V$), elle-même directement liée à la différence des niveaux de fermi entre deux régions ; ceci est réalisable par une jonction p/n ou une hétérojonction.

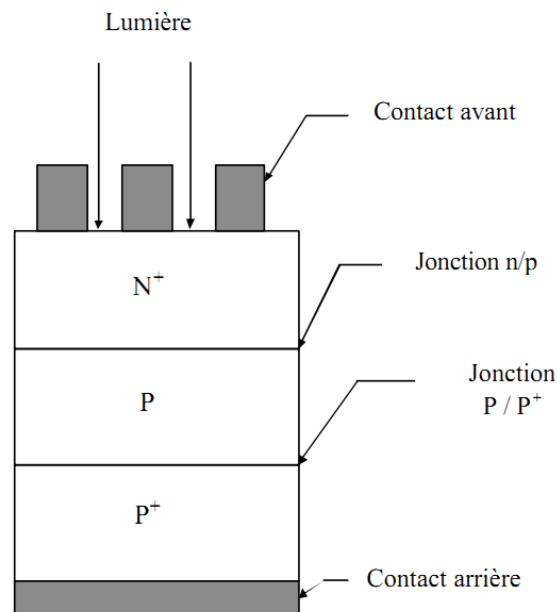


Figure III.1 : Structure de base d'une cellule solaire [12]

2.3. Paramètres de la cellule solaire :

La cellule solaire est caractérisée par le rendement de conversion, une tension à circuit ouvert V_{co} , un courant à court-circuit I_{cc} et un facteur de suffisance ff . Ces paramètres sont déterminés à partir des caractéristiques courant-tension. Leur détermination permet les comparaisons de différentes cellules éclairées en conditions identiques.

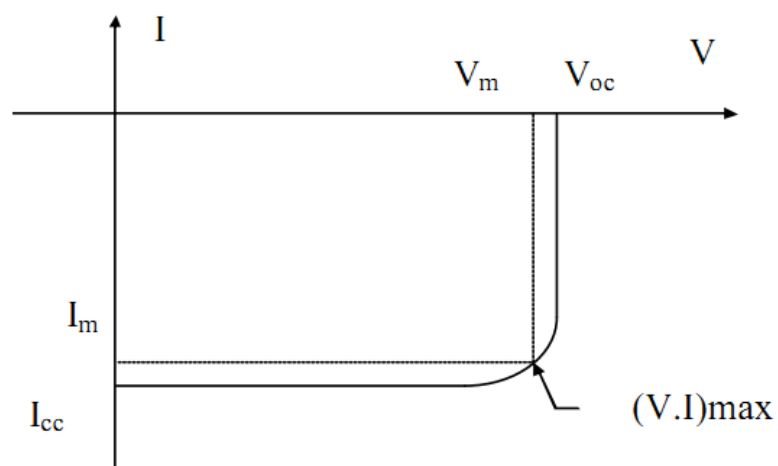


Figure III.2 : Caractéristiques courant-tension d'une cellule solaire [12]

2.3.1. Courant de court-circuit, I_{cc} :

Le courant de court-circuit est le courant obtenu quand les bornes de cellules sont court-circuitées ($V=0$ sur le schéma 2). Il augmente linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule

2.3.2. Tension de circuit ouvert, V_{co} :

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant de cellule est nul. Il est lié à la résistance de shunt et à la barrière d'énergie. Sa valeur diminue avec la température et change peu avec l'insolation.

2.3.3. Le rendement η :

Le rendement de conversion η d'une cellule solaire de surface A est déterminé par le rapport de la puissance maximum P_m délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_0

$$\eta = \frac{p_m}{p_0} = \frac{I_m \cdot V_m}{P_0 \cdot A} \quad (\text{III. 1})$$

P_0 est la densité de puissance incidente, I_m et V_m sont respectivement le courant et la tension correspondant au point de puissance maximale de la courbe I-V. On peut le situer graphiquement au point de la tangente de la caractéristique I-V avec l'hyperbole de l'équation : $I \times V = P_m$. V_{co} et I_{cc} sont respectivement la tension à circuit ouvert et le courant à court circuit. [12]

2.3.4. Facteur de forme

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée $V_m \cdot I_m$ et la puissance idéale $V_{co} I_{cc}$, on le note :

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{III. 2})$$

FF : Facteur de forme

I_{cc} : Courant de court-circuit (obtenu pour $V=0$)

V_{co} : Tension en circuit ouvert (Obtenue pour $I=0$)

I_m : Courant à la puissance maximale

V_m : Tension à la puissance maximale

L'expression du rendement devient :

$$\eta = \frac{V_m I_m}{p_0 A} = FF \frac{V_{co} I_{cc}}{p_0 A} \quad (\text{III. 3})$$

Une fois qu'une cellule solaire est chargée avec une charge résistive constante, la charge est présentée avec un point quelque part sur la caractéristique de cellules d'I-V. Quand la charge augmente, le point de fonctionnement se déplace le long de la caractéristique vers la droite. Cependant, une diminution de la charge fait monter le point de fonctionnement de la caractéristique vers la gauche.

2.4 Principe de fonctionnement de la cellule solaire:

Une cellule solaire est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique ; cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants:

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur
- Collecte des porteurs photos générés par les contacts métalliques (électrodes)

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons Trou créées est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction PN. D'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky peuvent également être utilisées.

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques est illustré sur la figure3.

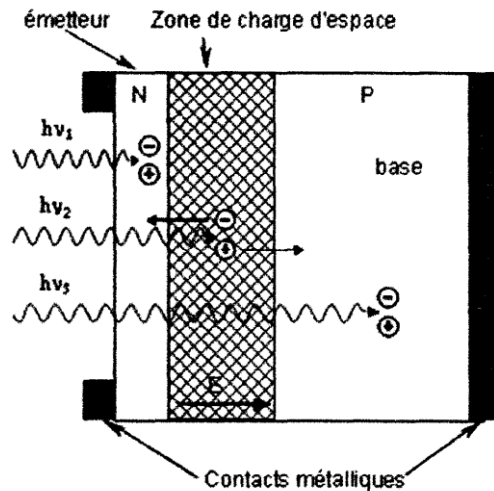


Figure III.3 : Schéma de La structure d'une cellule solaire et illustration des phénomènes de Photo génération et de collecte de porteurs [14].

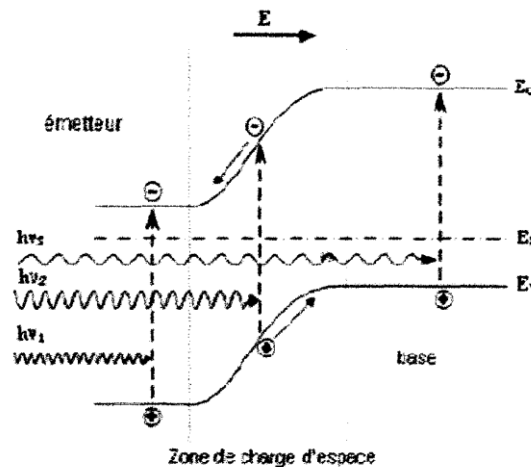


Figure III.4: Diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque [14].

Les photons incidents créent des porteurs dans la zone n et p et dans la zone de charge d'espace. Les porteurs auront un comportement différent suivant la région

Dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires. On aura un courant de diffusion.

Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique: les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un courant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photo courant résultant 1. C'est Un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel a l'intensité lumineuse.

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit:

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc}(V) \quad (III.4)$$

I_{ph} : densité de courant photo généré

I : densité de courant d'obscurité

Le courant délivré sur une charge par une cellule solaire idéale éclairée s'écrit:

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (III.5)$$

q : Charge élémentaire;

J_s : Courant de saturation de la diode;

V : tension de photo polarisation

k : constante de Boltzmann

T : température (en K)

n : Facteur d'idéalité de la diode (égal à 1 si la diode est idéale et égal à 2 si La diode est entièrement gouvernée par la génération/ recombinaison) [14]

La longueur de diffusion des électrons photo générés est plus grande que celle des trous. La base, de type P présente une épaisseur relativement grande $\cong (250 - 300 \mu m)$ et est faiblement dopée (environ $10^{16} \text{ at} / \text{cm}^{-3}$) afin de limiter les phénomènes les recombinaison, l'émetteur de type N, est de faible épaisseur ($\cong 0.2 \mu m$) et fortement dopé (environ $10^{21} \text{ at} / \text{cm}^{-3}$) afin d'obtenir un champ électrique suffisant dans la ZCE ($\cong 0.3 \mu m$) [15].

3. Pertes physiques:

3.1. Pertes par les photons de grande longueur d'onde:

Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent générer de paires électron/trou; et sont donc perdus. Un modèle plus détaillé du phénomène permet toutefois de considérer les mécanismes d'absorption assistée par phonons voir la figure 5. Ceci repousse la limite de l'énergie du gap du silicium de 1,24 eV à 1,052 eV dans le cas d'une absorption assistée par un phonon.

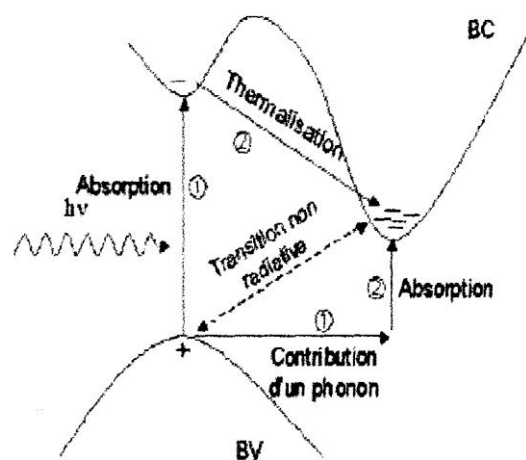


Figure III.5: Transition inter bandes d'électrons dans un semi-conducteur, les cas d'un gap indirect [14]

3.2. Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons:

Un photon absorbé génère seulement une paire électron – trou, l'excès d'énergie, supérieure à la largeur de la bande interdite; est principalement dissipé sous forme de chaleur (thermalisation).

Sous un éclairage AM 1,5, ces pertes sont évaluées à 33% de la puissance totale dans le cas du silicium

3.3. Facteur de tension:

C'est le rapport de la tension maximale développée par la cellule V_{co} par la tension de gap E_g/q . La tension aux bornes d'une cellule n'est qu'une fraction de la tension du gap. De plus, à cause des recombinaisons Auger, V_{co} ne pourra dépasser 0,65 V pour le silicium et 0,72 V pour les cellules très minces d'épaisseur 20 μm .

3.4. Facteur de forme:

Les équations courant tension sont régies par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle. La courbe $J(V)$ ne peut donc avoir une forme rectangulaire et même dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme ne peut dépasser 0,89. Ce terme dépend fortement des phénomènes de recombinaison des porteurs ainsi que les pertes par résistance série et parallèle.

Le rendement est donc limité par ces différents facteurs à une valeur théorique maximale de 29%.

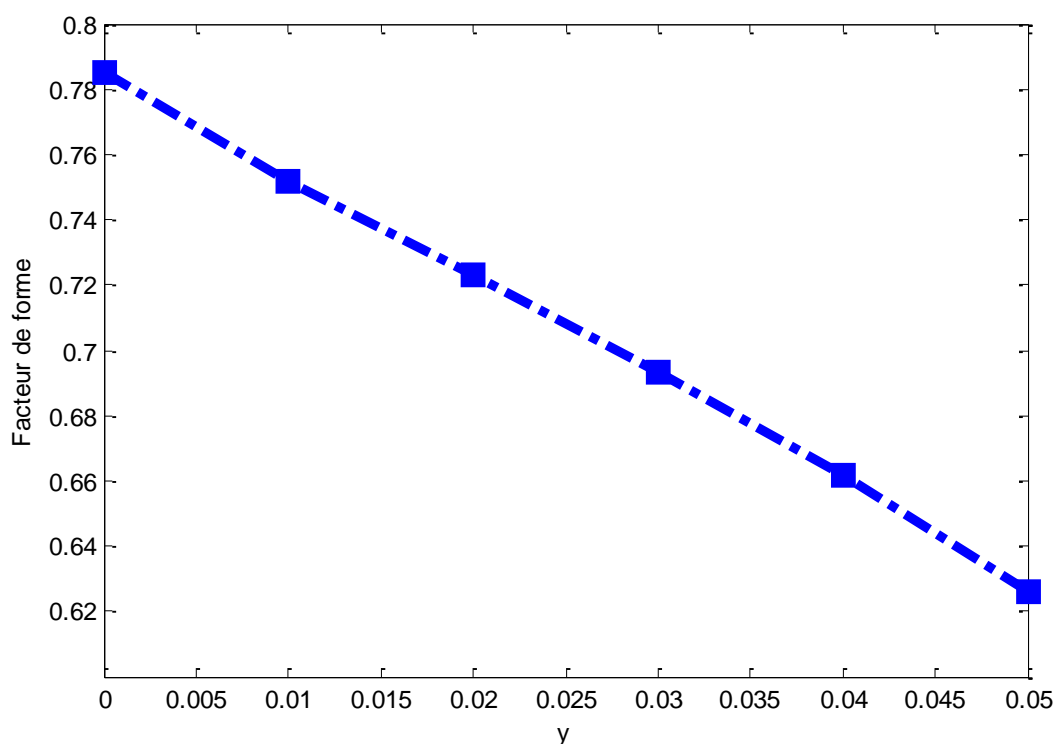


Figure III.6 : Variation du facteur de forme en fonction de la concentration de l'azote.

On voit que la concentration de l'azote a pour effet de diminuer le facteur de forme

4. Pertes technologiques:

4.1. Réflectivité:

Une partie de l'énergie incidente est réfléchiée par la surface non métallique de la cellule. Ce problème technologique peut être résolu par une bonne texturisation de la surface de la cellule recouverte d'une couche antireflet.

4.2 .Taux d'ombrage:

A_F est la superficie de la surface avant non couverte par le contact métallique (équation 27) et A est l'aire totale, il s'agit d'une limite technologique engendrée par le taux de couverture $1-A_F/A_t$.

Le taux d'ombrage est un compromis entre les pertes dues à la couverture partielle de l'émetteur par les contacts et les pertes du facteur de forme provoqué par la résistance série liée à la largeur de la métallisation.

4.3. Absorption incomplète due à l'épaisseur limite de la cellule:

A cause de l'épaisseur limitée de la cellule, une part de photon ayant néanmoins d'énergie requise traverse l'épaisseur de la structure sans être absorbé. Des techniques de "piégeage par réflexion" sur la face arrière peuvent augmenter significativement l'absorption même dans le cas de cellules très fines.

4.4 Rendement de collecte:

Les porteurs photo générés ne sont pas tous collectés, certains se recombinent dans le volume ou à la surface de la cellule. Le rendement de collecté est défini comme le rapport entre le nombre de porteurs effectivement collectés et le nombre total de porteurs photo générés.

Ces recombinaisons peuvent être réduites en mettant en œuvre différents traitements et en optimisant les procédés de croissance du silicium et de réalisation des cellules.

4.5 Pertes liées à la recombinaison en surface:

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés...) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface.

5. Technologie pour améliorer les performances des cellules solaires:

5.1 Technologies pour réduction des pertes optiques:

Les pertes optiques correspondent aux photons réfléchis sur la face avant et à ceux transmis à travers la cellule sans être absorbés, alors qu'ils auraient pu générer des paires électrons -trous.

Elles affectent ainsi fortement le courant de court circuit I_{cc} . Mis à part la minimisation du recouvrement de la face avant par les contacts métalliques, qui doit être un compromis avec l'obtention d'une bonne résistance série, la réflectivité de la face avant peut être réduite grâce à la texturisation et à l'utilisation d'une couche antireflet (CAR). Enfin, le chemin optique dans la cellule peut être allongé par la combinaison de la texturisation et de l'utilisation d'un réflecteur sur la face arrière, augmentant ainsi la probabilité d'absorption des photons. Nous allons présenter ces techniques séparément

5.1.1 Texturisation de La surface:

La texturisation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique (typiquement 5-10 μm) généralement de forme pyramidale, permettant des réflexions multiples.

Comme illustré sur la figure 7, un rayon arrivant à incidence normale (par rapport au plan de la cellule) sur une pyramide sera réfléchi sur la face d'une pyramide adjacent. Cette double réflexion sur les pyramides diminue le coefficient de réflexion totale de R à R^2 . De plus, le rayon transmis dans la cellule est avec un angle de réfraction différent de 0° , augmentant son parcours au sein du silicium par rapport au cas d'une surface plane. La probabilité d'absorption des photons en est donc améliorée. Enfin, la texturisation de la face arrière entraîne un piégeage plus important de la lumière au sein de la cellule.

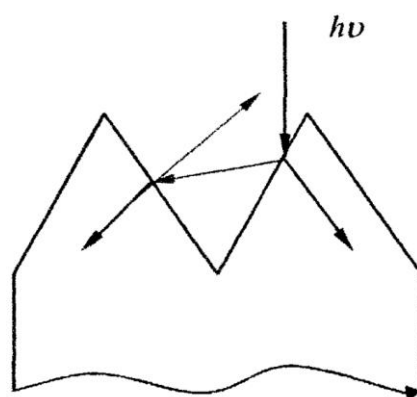


Figure III.7: Schéma comparatif de phénomènes de réflexion sur une surface plane de texture [14]

5.1.2 Couche antireflet (CAR):

Afin de diminuer davantage la réflectivité, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Comme illustré sur la figure 8 le choix de l'indice de réfraction n_{CAR} et de l'épaisseur d_{CAR} de la couche mince peut conduire à l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semi-conducteur. Pour les cellules PV à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée.

-L'indice de réfraction optimal n_{CAR} s'écrit:

$$n_{CAR} = \sqrt{n_0 n_{Si}} \quad (III.6)$$

Où : n_0 et n_{Si} sont respectivement les indices de réfraction de l'air et du silicium

-Les épaisseurs possibles pour la couche antireflet sont

$$d_{CAR} = \frac{(2.N+1)\lambda}{4.n_{CAR}} \quad (III.7)$$

Avec N entier: N=0. 1. 2. 3.4.....

Le SnO_2 présente des caractéristiques appropriées pour réaliser une couche antireflets et a donc été largement utilisé dans l'industrie PV

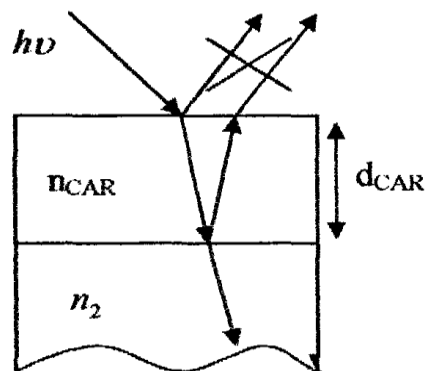


Figure III.8 : Principe d'action d'une couche antireflet [14]

5.1.3 Réflecteur arrière BSR:

La quantité de lumière absorbée dans la cellule solaire est fonction du chemin optique et du coefficient d'absorption. Ainsi, plus l'épaisseur de la cellule est faible, plus il est nécessaire d'accroître le chemin optique au sein du silicium

L'utilisation d'un BSF (Back surface Field) en aluminium sur toute la surface arrière élimine la texturisation de cette face et les propriétés optiques de ce métal (Al) ne sont pas satisfaisantes pour faire office de réflecteur arrière. La solution est d'utiliser un réflecteur arrière BSR qui Consiste à déposer un TCO sur la métallisation arrière. Si le TCO est texturé, il fait office de diffuseur de lumière afin d'augmenter le trajet des rayons lumineux dans la cellule cette augmentation de trace permet ainsi d'augmenter sensiblement le courant débité par la cellule.

5.1.4 La passivation:

La passivation Consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitrure de silicium hydrogène (SiN_xH),

L'optimisation de ces différents paramètres (présents si dessus) a permis de définir une structure de cellules solaires à haut rendement représentée sur la figure 9.

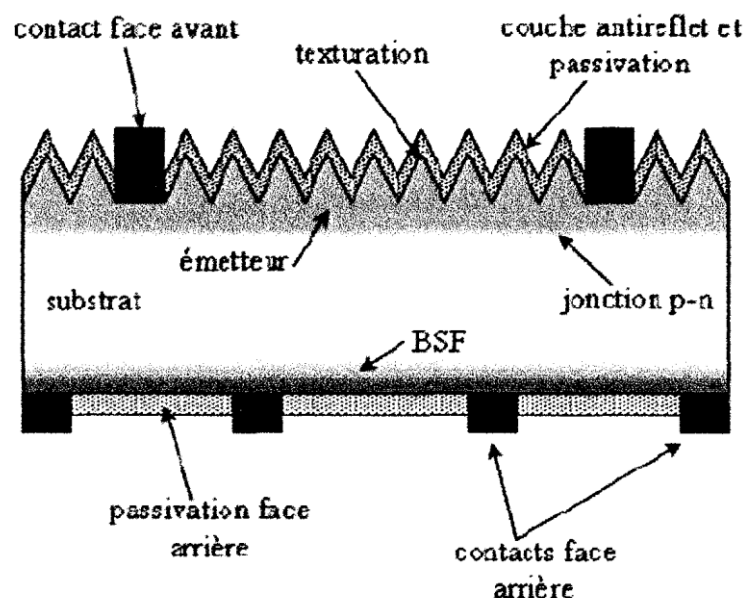


Figure III.9 : Composition d'une cellule photovoltaïque à haut rendement [14].

Nous avons tracé la caractéristique courant – tension comme suit :

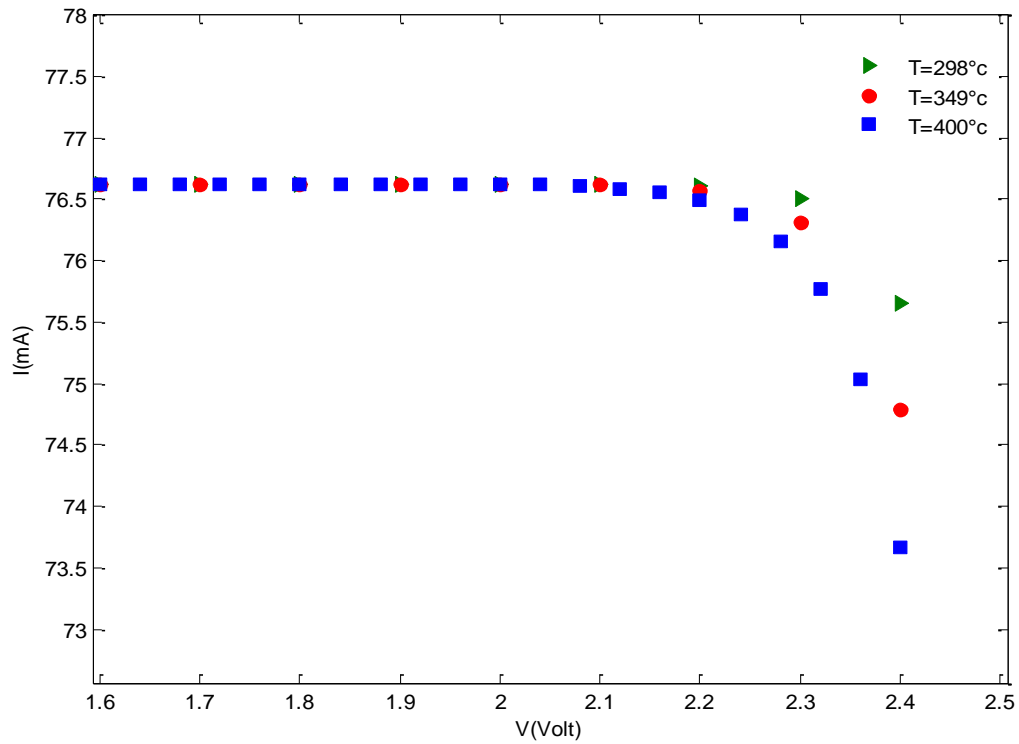


Figure III.10 : Caractéristique courant - tension d'une cellule PV température constante en fonction de la température T pour $y = 0.08$

Nous avons tracé la caractéristique courant-tension comme suit :

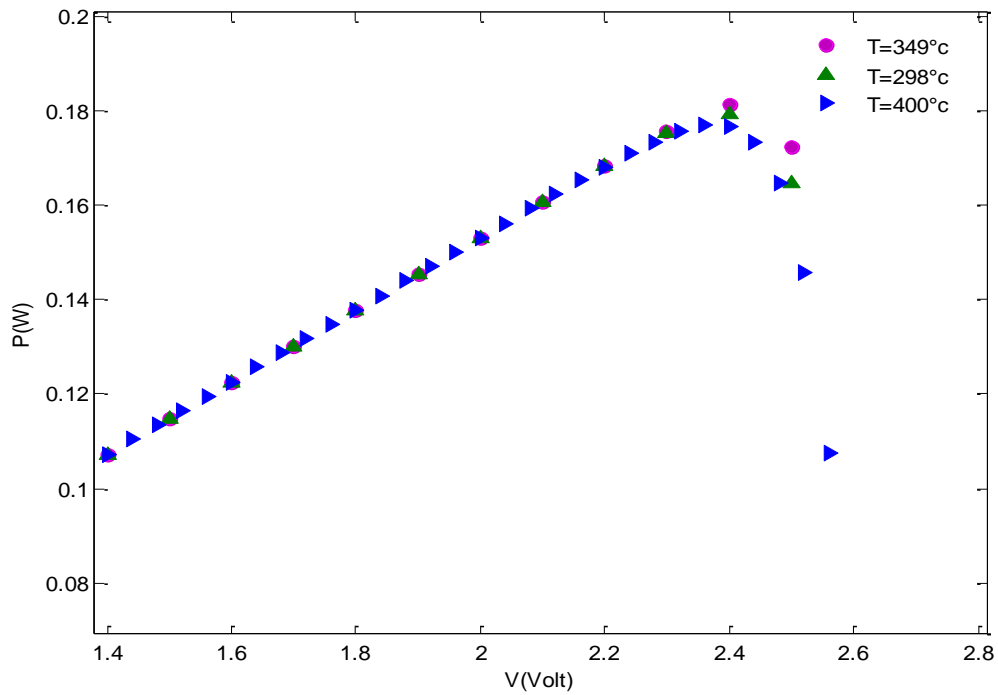


Figure III.11 : La variation de la puissance de sortie en fonction de la tension pour $y = 0.08$

On remarque une légère amélioration de la caractéristique puissance tension avec l'augmentation de la tension et on observe une puissance maximale $P_{Max} = 0.18 \text{ W}$ pour $T = 349 \text{ K}$.

La courbe de la tension à court-circuit V_{CO} en fonction de la fraction d'azote :

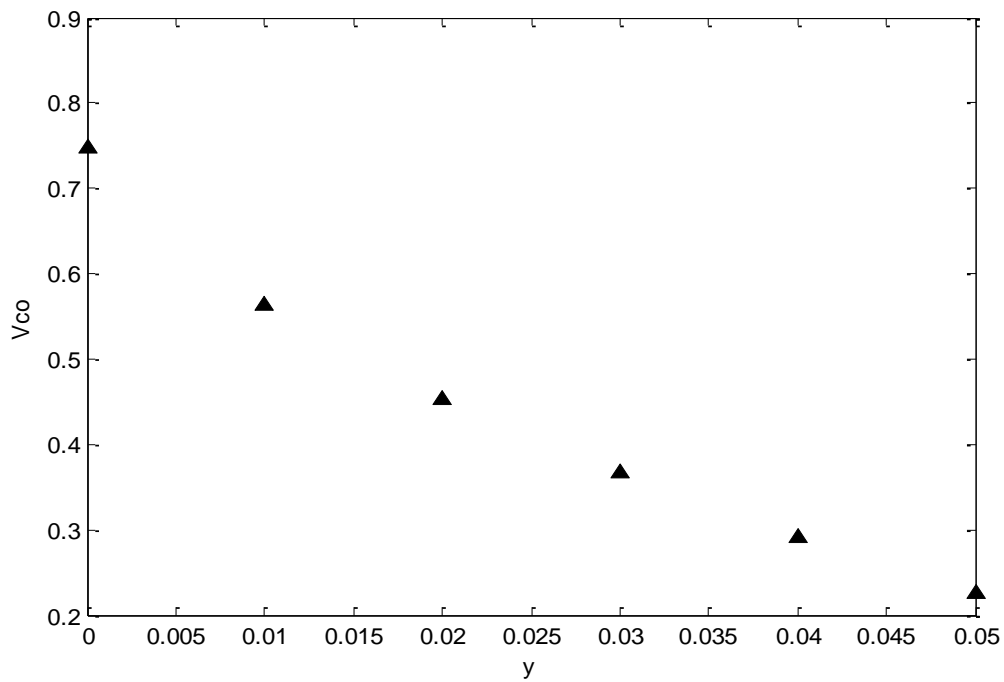


Figure III.12 : Variation la tension à circuit-ouvert V_{co} en fonction de la concentration de l'azote

L'augmentation de la concentration de l'azote entraîne une diminution de la tension à circuit ouvert V_{co} .

La courbe du rendement en fonction de l'incorporation de l'azote :

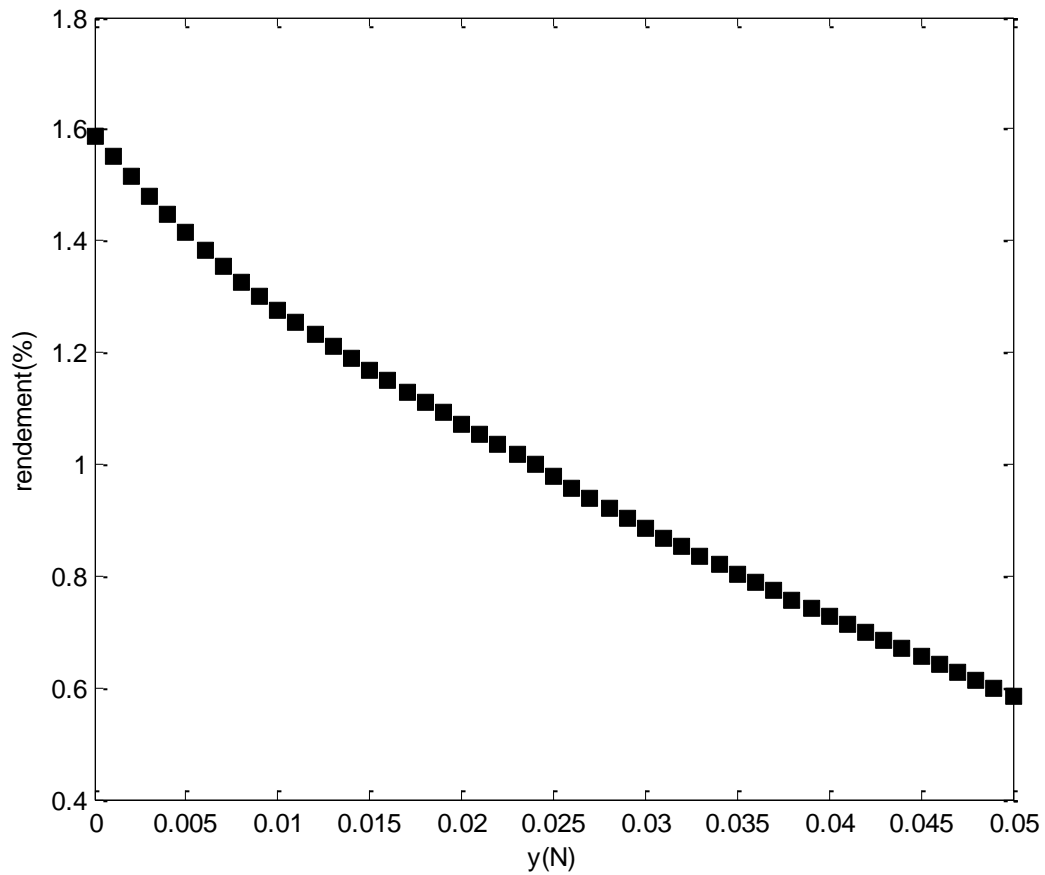


Figure III.13 : Variation de rendement en fonction de la concentration de l'azote

La figure 13 montre une diminution de rendement de conversion avec la croissance de la concentration d'azote.

6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules solaires et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres (V_{co} , I_{co} , FF) limitant le rendement de conversion.

Bibliographie :

- [1] : Mme Benahmed Benabdallah Nadia « Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellules solaires à base de Si et SiGe » thèse de magister université Abou Bekr Belkaid -Tlemcen juillet 2006
- [2] : Jérôme fait institut de physique, université de Neuchâtel mai 2001
- [3] : pierre-noël favennec « Technologies pour les composants a semi conducteurs »
- [1] : Nom du docteur « titre de la thèse » thèse de ‘’ université l’année
- [4] : H.Mathieu, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Masson, Paris, 1996.ISBN: 2-225-85124-7.
- [5]: S. M. SZE, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, 1981.
- [6] : T. Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en développement », Manuel D’installation et d’utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l’Energie, (AFME)
- [7] : MR Maouedj Rachid «Application de l’energie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Telemcan et de Bouzareah » Université Abou Bekr Belkaïd Magister Soutenue décembre 2005-2006
- [8] : Beiser A. Physique Appliquée : Cours et Problèmes. McGrawHill, série Schaum
- [9] : Dr. Aissat «Modélisation et Simulation du gain optique et du courant de seuil d’un laser à puits quantique contraint à base de $\text{GaIn}_{1-x}\text{NAs}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$ » Thèse de doctorat Année 2007
- [10] : J W matthews and A.E Blahéslee, « defects in epitaxial multilayers, I: misfit dislocations, J. crystal Growth 27 (1974) 118-125
- [11] : Seghilani Mohamed Messabih Abdelkader « Etude et Simulation d’une structure a puits quantique contraint a base de $\text{GaInNAs}/\text{GaAs}$ emettant $1,55\mu\text{m}$ pour fibre optique monomode » Ingénieur 2008-2009
- [12] :Mm.Tala-Ighil Razika « Etude et réalisation d’une cellule photovoltaïque à hétéro structure avec contact sérigraphie. » thèse de doctorat université de Boumerdès 2007
- [13] : Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller et Bocar Sada Sy, « Le Pompage Photovoltaïque », Manuel de cours à l’intention des ingénieurs et des techniciens, Institut de l’énergie des pays ayant en commun l’usage du français.
- [14] : Mr.Nichipornk Oleksity « simulation, fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacts arrières inter digités » thèse de doctorat, l’institut national des sciences appliquer le Lyon 2005 »

[15] : Mlle Dalila Hocine « simulation et analyse des cellules solaires à hétéro structures de type $\text{SnO}_2 / \text{SnO}_2\text{Si(N)}$ » mémoire de magister université de Tizi-Ouzou

[16]: People and J.c Bean“calculation of cristal layer thickness versus lattice_mismatch for Gexsil_X/Si strained layer hetrostructures” Appl.phy.lett 47 (1985) 322-324.

[17] : C.G.Van de walle,”Bande linups and deformation potentials in the model_solidtheory”plys rev.B,39 (1989) 187_1883

[18] :M P. krijn,”H electrojunction band offsets and effects and.sci.Technol (1991) 27_31

Sc optoélectronique : tableau de l'énergie du Gap

Conclusion générale :

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. De différentes pertes viennent influencer sur le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plus part des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent générer de paires électron-trou, et sont donc perdus. Le rendement d'une cellule dépend aussi à la base du nombre de photons y pénétrant.

Dans le but d'étudier les caractéristiques de l'alliage ternaire GaAsN/GaAs nous avons commencé par les caractéristiques électroniques et on voit que l'azote a pour effets Diminuer les paramètres de maille, la contrainte et l'énergie du gap. Pour les caractéristiques optoélectroniques, l'incorporation de l'azote fait augmenter le coefficient de l'absorption.

Nous avons présenté une description générale des cellules solaires, la structure de base, le principe de fonctionnement ainsi que ses différents types. Nous avons déterminé aussi les paramètres de la cellule solaire qui sont caractérisées par le rendement de conversion , une tension à circuit ouvert V_{co} , un courant à court-circuit I_{cc} et un facteur de suffisance ff . Ces paramètres sont déterminés à partir des caractéristiques courant-tension. Leurs déterminations permettent les comparaisons de différentes cellules éclairées en conditions identiques. Pour notre cas nous avons marqué un rendement de 16 %