



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Med Khider Biskra

Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie

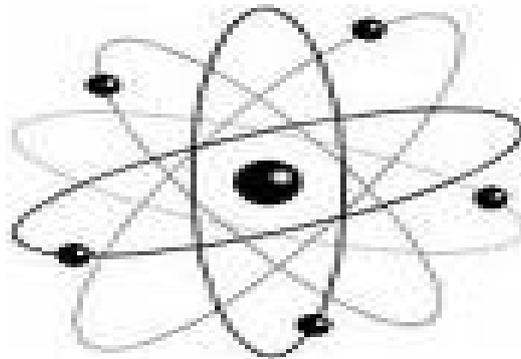


Département des Sciences de la Matière

Domaine des Sciences de la Matière

Filière de Physique

Spécialité Physique des Matériaux



*Mémoire de fin d'étude en Master*

*Intitulé :*

*Effet de la lumière sur les caractéristiques électriques des dispositifs à semi conducteurs*

Presenté par:

Moussaoui Nadia

Devant le Jury Composé par :

*S.Al Akuel*

*M.C. « A »*

*Université Med Khider- Biskra*

*Président*

*N.Sengouga*

*Professeur*

*Université Med Khider- Biskra*

*Rapporteur*

*T.Tibrmacine*

*M.C. « B »*

*Université Med Khider- Biskra*

*Examineur*

Année Universitaire

2012-2013

## *DEDICACE*

*Je dédie ce mémoire :*

*A mes très chers parents pour leurs dévouements, leurs amours, leurs sacrifices et leurs encouragements et sans qui je ne serais pas là aujourd'hui. Ce travail soit, pour eux, un faible témoignage de ma profonde affection et tendresse.*

*A ma Cher grand-mère Je demande à Dieu que Vous donne une longue vie*

*Je dédie aussi cette modeste réalisation à :*

*Mes très chers frères : Said, Gani, Ibrahim et Anwar.*

*Mes chères sœur : Zohera, Saliha*

*Ma cher tant Aicha, et son fille Njah.*

*Mes chers amis Houda et Nadia. Djamila, Zahra, Saida, Maryem, karima*

*Ainsi que pour tous mes amis et mes collègues.*

# REMERCIEMENTS

*J'ai eu la chance d'effectuer ce travail minutieux dans deux laboratoires de recherche « laboratoire de des Matériaux Semiconducteur et Métallique de Biskra », Pour mettre tout le matériel à ma disposition pour faire le travail*

*Avant toute chose, je tiens à remercier le Dieu pour m'avoir donnée la force et la patience pour fait ce travail.*

*La première personne que nous tenons à remercier est Professeur Sengouga Nour Aldine. D'avoir accepté de nous encadrer et qui a su nous laisser la liberté nécessaire à l'accomplissement de notre recherche, et pour tout sa bienveillance, ces précieux conseils et ces encouragements incessants durant toute la période de la réalisation de ce travail.*

*Nous aimerons remercier tout particulièrement Dr Toufik Tibermasine et Dr Bakhouche. Pour nous avoir accueillies au sein du laboratoire*

*Toutes mes salutations à toute personne ayant participé de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail, trouve ici l'expression de mes très vifs remerciements.*

# SOMMAIRE

Dédicace .....	i
Remerciement.....	ii
Sommaire.....	iii
Liste des figures .....	vi
Résumé.....	ix
Introduction général.....	1

## Chapitre I : Notions générales sur les semi conducteurs

I.1. Introduction .....	03
I.2. Définition d'un semi conducteur .....	03
I.3. Bande interdite (gap).....	04
I.4. Différents types des semiconducteurs .....	05
I.4.1. Les semi conducteurs intrinsèques .....	05
I.4.2. Le dopage des semi conducteurs .....	07
I.5. La conductivité .....	10
I.6. Courants dans le semiconducteur .....	12
I.7. Bandes d'énergie .....	13
I.8. Le silicium .....	15
I.8.1. Quelques propriétés du silicium .....	15
I.8.2. Les impuretés dans le silicium .....	15
I.9. Arsenic de Gallium (GaAs).....	16
I.9.1. Structure de bande d'énergie de GaAs .....	16
I.9.2. Propriétés électroniques du GaAs.....	17
I.9.3. Structure cristalline du semi conducteur GaAs .....	18

## Chapitre II : Les diodes

II.1. Introduction .....	20
II.2. La définition du photodétecteur .....	20
II.2.1. Le Principe de la photodétection .....	21
II.2.2. Les Paramètres d'un photodétecteur .....	22
II.2.3. Les différents types des photodétecteurs .....	23
II.2.3.1. La photodiode PN classique .....	23
II.2.3.2. La photodiode PIN .....	24
II.2.3.3. La photodiode à avalanche .....	25
II.2.3.4. Le photodétecteur MSM.....	27
II.2.4. Les caractéristiques courant-tension des photodétecteurs.....	27
II.3. Les diode Schottky .....	28
II.3.1. Définition la diode Schottky .....	28
II.3.2. Caractéristiques courant-tension d'une diode Schottky.....	30
II.3.2.1. Diode au Si.....	30
II.3.2.2. La diode Schottky GaAs .....	32
II.3.3. Applications de diodes Schottky .....	32

## Chapitre III : Étude expérimentale

III.1. Introduction.....	34
III.2. Les échantillons .....	34
III.2.1. Les diodes Schottky en MQW GaAs/AlGaAs).....	34

III.2.2. La photodiode PIN en Si.....	35
III.3. Les montages expérimentaux .....	35
III.3.1.Caractéristiques courant-tension.....	35
III.3.1.1. Source mètre .....	36
III.3.1.2. Contrôleur de l'intensité.....	36
III.3.2.Caractéristiques capacité-tension.....	37
III. 3.2.1. La capacitance mètre.....	37
III.3.2.2. Source de la tension .....	37
III.3.2.3. LabView.....	38
III.4. Mesure des caractérisations électriques.....	39
III.4.1. Les Caractéristique courant–tension pour les diodes Schottky.....	39
III.4.2. Les Caractéristique courant –tension pour la photodiode (BPX65).....	45
III.4.3. Les Caractéristique capacité –tension dans la photodiode (BPX65).....	47
Conclusion générale.....	52
Références bibliographiques.....	54

Annexes A

Annexes B

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I. 1</b> : Diagrammes des bandes d'énergie d'un isolant, un semi conducteur et Un cnducteur.....	04
<b>Figure I. 2</b> : Représentation schématique d'un conducteur intrinsèque.....	06
<b>Figure I.3</b> : (a) processus direct sans changement de vecteur d'onde,(b) processus Indirect, avec intervention d'un photon et un phonon .....	07
<b>Figure I.4</b> : Représentation schématique des liaisons électroniques pour semi-conducteur silicium (Si)dopé Ppar du Bohr(B).....	08
<b>Figure I.5</b> :semi-conducteur type P.a)Diagramme des bandes d'énergie b)Densité. D'états énergétique. c) Distrubition de fermi Dirac d) densités énergétiques de porturs(les densité de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurée).....	09
<b>Figure I.6</b> : Représentation schématique des liaisons électroniques pour semi-conducteur silicium (Si) dopé P par de l' Arsenic(As) .....	09
<b>Figure I.7</b> :semi-conducteur typeN.a)Diagramme des bandes d'énergie b)Densité.. D'états énergétiques. c) Distrubition de fermi Dirac d) densités énergétiques de Porturs (les densité de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurée).....	10
<b>Figure I.8</b> : Diagrammes des bandes d'énergie de semi-conducteurs.....	14
<b>Figure I.9</b> : structure de bande de GaAs .....	17
<b>Figure I.10</b> : sutructure cristalline du semiconducteur GaAs .....	19
<b>Figure II.1</b> :Principe d'absorption de la lumière dans le cas de semi conducteur .... Intrinsèque et extrinsèque .....	21
<b>Figure II.2</b> :la photodiode PN.....	23
<b>Figure II.3</b> :géométrie schématiques de photodiodes PIN :flux optique et transport De charges (a) colinéarires et (b) orthogonaux.....	25
<b>Figure II.4</b> :effet avalanche :une paire électron-trou photocrée génère d'autres paires par ionisation par impact .....	26
<b>Figure II.5</b> :courbe I-V dans l'obscurité et sous illumination pour les différentes températures.....	28
<b>Figure II.6</b> :représentation schématique de contact Schottky Situés entre le métal Et semi conducteur.....	29
<b>Figure II.7</b> :Courbe I-V et le diagramme de bande d'énergie pour une diode Schottky AL/Side type n ayant une structure planaire.....	31
<b>Figure II.8</b> : Les caractéristiques I-V inverses pour d'une diode Schottky A1/n-Si avec deux résistivités différentes de substrat .....	31
<b>Figure II.9</b> : Les caractéristiques I-V direct pour d'une diode Schottky Au/n-GaAs Diodes fabriqué sur un substrat de différentes orientations.....	32
<b>Figure III.1</b> : montage expérimenta pour mesurer les caractéristiques courant-tension des diodes Schottky.....	36
<b>Figure III.2</b> : montage expérimenta pour mesurer les caractéristiques courant-tension des photodiodes PIN .....	36
<b>Figure III.3</b> : montage expérimenta pour mesurer les caractéristiques courant-tension des photodiodes PIN sous l'effet de la lumière.....	37
<b>Figure III.4</b> :le schéma de commande du capacitance mètre Boontoon 7200 par Lab View.....	38
<b>Figure III.5</b> :un exemple de la fentère de commande du capacitance mètre Boontoon 7200 par Lab View.....	39
<b>Figure III.6</b> : Les caractéristiques courant –tension direct de la diode Schottky NU780 en obscurité et sous la lumière ambiante.....	40
<b>Figure III.7</b> : Les caractéristiques courant –tension inverse de la diode Schottky NU780 en obscurité et sous la lumière ambiante.....	41
<b>Figure III.8</b> : Les caractéristiques courant –tension direct de la diode Schottky NU781en obscurité et sous la lumière ambiante.....	42
<b>Figure III.9</b> : Les caractéristiques courant –tension inverse de la diode Schottky NU781en obscurité et sous la lumière ambiante.....	43

<b>Figure III.10</b> : Les caractéristiques courant –tension direct de la diode Schottky NU785en obscurité et sous la lumière ambiante.....	44
<b>Figure III.11</b> : Les caractéristiques courant –tension inverse de la diode Schottky NU785en obscurité et sous la lumière ambiante.....	45
<b>Figure III.12</b> : Les caractéristiques courant –tension indirect de la photodiode PIN Pour différentes intensité lumineuse.....	46
<b>Figure III.13</b> :le courant indirect de la photodiode PIN en fonction de l'intensité lumineuse pour différentes tension indirectes.....	47
<b>Figure III.14</b> : la caractéristique C-V inverse de la photodiode pour une intensité lumineuse de 10 W.....	48
<b>Figure III.15</b> : la caractéristique C-V inverse de la photodiode pour une intensité lumineuse de 12 W.....	48
<b>Figure III.16</b> : la caractéristique C-V inverse de la photodiode pour une intensité lumineuse de 13 W.....	49
<b>Figure III.17</b> : la caractéristique C-V inverse de la photodiode pour une intensité lumineuse de 15 W.....	49
<b>Figure III.18</b> : la caractéristique C-V inverse de la photodiode sous l'effet de différentes intensités lumineuses .....	50

## Résumé

L'effet de la lumière sur les caractéristiques courant-tension (I-V) pour trois diodes Schottky et une photodiode est mesuré. Pour la photodiode, l'effet de la lumière sur les caractéristiques capacité-tension (C-V) est aussi mesuré. Les caractéristiques I-V sont mesurées manuellement tandis que les caractéristiques C-V sont automatisées à l'aide du logiciel LabView. Les diodes Schottky sont à base de puits quantiques multiples en GaAs/AlGaAs (MQW : Multi Quantum Well). La photodiode est une jonction PIN commerciale (BPX65 de Siemens) à base de Si cristallin. Il a été trouvé que le courant (direct et inverse) augmente en valeur avec l'augmentation de l'intensité de la lumière pour tous les échantillons. Le courant inverse des diodes Schottky augmente avec l'augmentation de la tension inverse indiquant la présence des défauts. La capacité de la photodiode augmente aussi avec l'augmentation de l'intensité de la lumière.

**Les mots clé :** les diodes Schottky (GaAs /AlGaAs), photodiode PIN, effet de la lumière, caractéristiques (I-V), caractéristiques (C-V).

# Introduction générale

Les dispositifs à semiconducteurs sont au cœur de la révolution microélectronique de 20<sup>ème</sup> siècle. Ils ont permis, depuis l'invention du transistor dans les années quarante, et le circuit intégré dans les années soixante, à l'évolution de l'électronique, de l'informatique, des télécommunications et d'autres domaines qui touchent le quotidien de notre vie.

La structure de base de n'importe quel dispositif électronique est la jonction P-N simple ou son équivalent : la diode Schottky qui est un contact redresseur entre un métal et un semiconducteur. Ces deux structures de base font l'objet des recherches continues aujourd'hui. Les recherches concernent principalement la recherche des matériaux plus performants du point de vue : idéalité, claquage, performances hautes fréquences, hautes températures et environnement hasardeuses. Les diodes à base de Silicium et Arséniure de gallium sont les plus utilisées. Le premier à une échelle large publique et le deuxième à des applications très spécifiques.

Le travail qui fait l'objet de ce mémoire est d'étudier l'effet de la lumière sur les caractéristiques électriques de deux types de diodes : une photodiode commerciale au silicium (ayant une structure PIN) et trois diodes de type Schottky à puits quantique (Multi Quantum Well, MQW) GaAs/AlGaAs fabriquées à l'Université de Nottingham (Angleterre). Pour la photodiode les caractéristiques courant-tension et capacité-tension ont été mesurées sous différentes intensités lumineuses. Pour les MQWs seules les caractéristiques courant-tension ont été mesurées sous différentes intensités lumineuses.

Ce mémoire comporte trois chapitres en plus d'une introduction et une conclusion: Au premier chapitre nous avons présenté des notions de base sur les semi conducteurs en particulier, leur définition, leur structure cristalline et énergétique, leurs types et leurs caractéristiques. Puis les propriétés spécifiques du Silicium (*Si*) et Arsenic de Gallium (*GaAs*) sont détaillées puisque les dispositifs caractérisés dans ce mémoire sont à base de ces deux semiconducteurs.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié la caractérisation électrique (courant-tension et capacité-tension) de deux types de dispositifs: des diodes Schottky utilisés dans ce travail, à savoir les photodiodes et les diodes Schottky.

Dans le troisième chapitre les appareils de mesure utilisés dans la caractérisation électrique sont présentés. Il s'agit de la source mètre, capacitance mètre et la source de la lumière. Ces appareils sont contrôlés par le logiciel LabView qui est aussi présenté. Ce chapitre présente aussi les caractéristiques courant-tension et capacité-tension mesurées sous l'effet de la lumière.

Le mémoire termine par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus.

# Chapitre I

## Notions générales sur les semi conducteurs

### I.1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter des notions de base sur les semi conducteurs. En particulier, leur définition, leur structure cristalline et énergétique, leurs types et leurs caractéristiques. Puis les propriétés spécifiques du Silicium (Si) et Arsenic de Gallium (GaAs) sont détaillés puisque les dispositifs caractérisés dans ce mémoire sont à base de ces deux semiconducteurs.

### I.2. Définition d'un semi conducteur

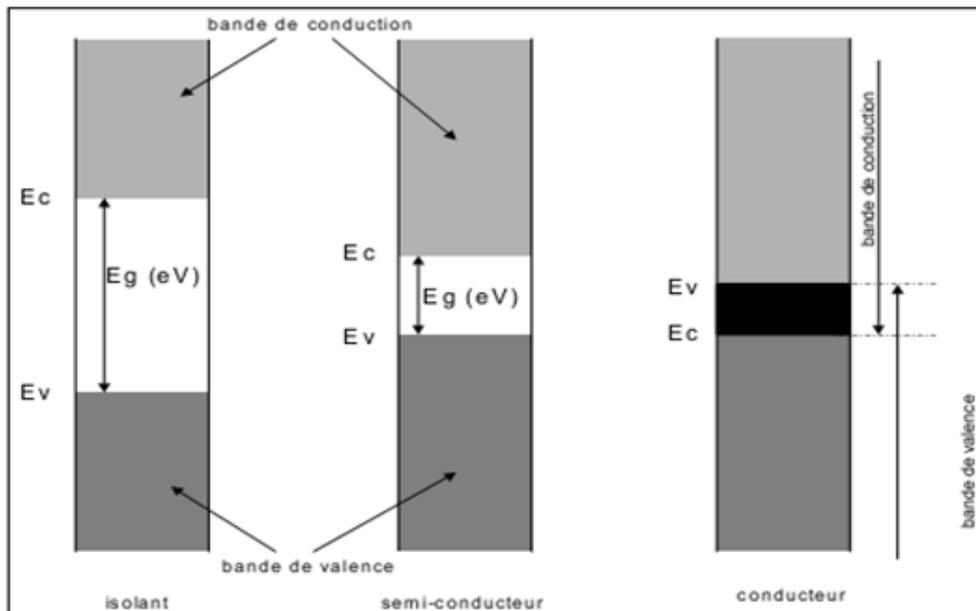
Du point de vue électrique, on différencie trois types des matériaux : les isolants, les conducteurs et les semi conducteurs. Ces derniers sont intermédiaires entre les métaux et les isolants : à  $T = 0$  K un semi conducteur se comporte comme un isolant. Néanmoins, il conduit l'électricité dès que la température augmente. La résistivité des semi conducteurs varie entre  $10^{-3} \Omega\text{cm}$  et  $10^9 \Omega\text{cm}$ , alors que celle des métaux est de l'ordre de  $10^{-6} \Omega\text{cm}$  et celle des isolants peut atteindre  $10^{22} \Omega\text{cm}$ . Un semiconducteur est donc un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais pour lequel la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique est suffisamment important. En d'autres termes, la conductivité électrique d'un semi-conducteur est intermédiaire entre celle des métaux et des isolants.

Le comportement électrique des semiconducteurs est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi conducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses bornes, un faible courant électrique apparait, provoqué à la fois par le déplacement de tels électrons et celui des « trous » qu'ils laissent dans la bande de valence. Dans un semi conducteur il existe deux types de conceptions : la conduction par électrons et la conduction par trou. Lorsque dans un cristal certaines liaisons entre atomes se cassent, les électrons sont libres de se déplacer. L'emplacement de la liaison cassée est appelé trou. Sous l'effet du champ électrique les électrons se déplacent dans le sens inverse du champ et les trous se déplacent dans le sens de champ.

### I.3. Bande interdite (gap)

La bande interdite est la mesure de la quantité d'énergie nécessaire à un électron pour passer de la bande de valence à la bande de conduction lorsque celui-ci est soumis à une excitation. Le matériau est appelé semiconducteur si le gap (notée  $E_g$ , unité : eV), ou la distance énergétique entre le bas de la bande de conduction et le sommet de la bande de valence, est inférieur à 2 eV (Figure I.1). C'est le cas des matériaux

Germanium (Ge), Si, GaAs, Phosphure d'Indium (InP). Le matériau est considéré comme un semiconducteur grand gap pour des valeurs du gap supérieures à 2 eV [1].



**Figure I.1 : Diagrammes de bandes d'énergie d'un isolant, un semi conducteur et un conducteur [1].**

Le carbure de silicium (3.26eV), le nitrure de gallium (3.39eV), le nitrure d'aluminium (6.1eV) ainsi que diamant (5.45eV) ont des largeurs de gap supérieures à 2 eV (Tableau I.1), c'est pourquoi nous parlons de matériaux grand gap. Pour de très grandes valeurs de gap, on parle de matériaux isolants.

La taille de la bande interdite donne des caractéristiques électriques importantes à chaque semi conducteur. En effet, la largeur de bande interdite fixe la limite en température au-dessous de laquelle le dispositif peut fonctionner sans détérioration, ainsi que l'aptitude du semiconducteur à résister aux radiations. La largeur de la bande interdite décroît avec la température et ses variations peuvent être décrites approximativement par la fonction suivante [1] :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{(a \cdot 10^{-4})T^2}{T+b} \quad \text{I.1}$$

Les valeurs des paramètres  $a$  et  $b$  sont données dans le Tableau I.1 pour différents matériaux.

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

**Tableau I.1: paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température [1].**

## I.4. Différents types des semi-conducteurs

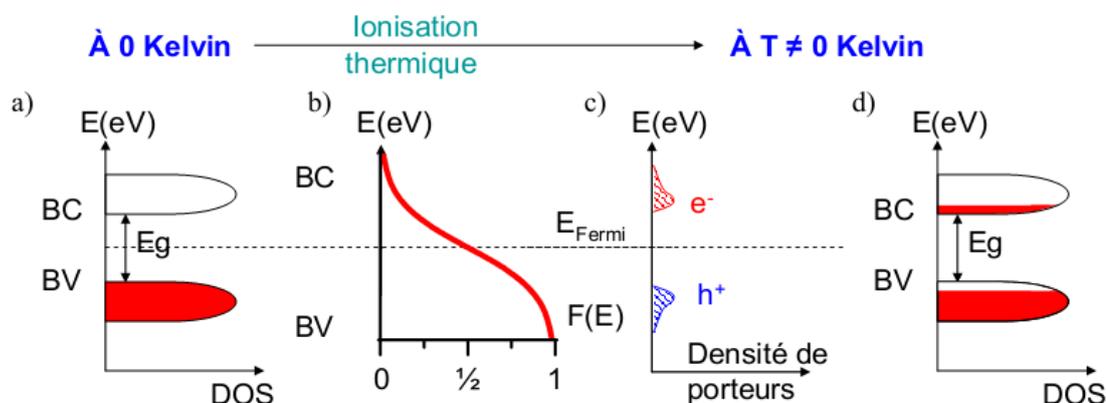
### I.4.1. Les semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur est dit intrinsèque si le nombre d'électrons est égal au nombre de trous. Le taux d'impuretés y est très faible (moins d'un atome pour  $10^{13}$  atomes de l'élément semi-conducteur).

Si l'on considère un semi-conducteur dans un état d'équilibre thermique à une température différente du zéro absolu, un processus de génération de paire électron/trou se produit en continu par agitation thermique. Il existe un processus inverse de recombinaison des charges. Les deux processus s'équilibrent et la densité de charge est ainsi stable. On dénombre donc autant d'électrons promus dans la bande de conduction que de trous présents dans la bande de valence. Les électrons et les trous vont pouvoir contribuer à la conduction électrique. La probabilité d'occupation des niveaux énergétiques du semi-conducteur à une température  $T$  donnée suit la loi de Fermi Dirac qui décrit les statistiques de l'occupation des trous et des électrons dans un matériau [2]. Cette loi est donnée par :

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{KT}\right)} \quad \text{I.2}$$

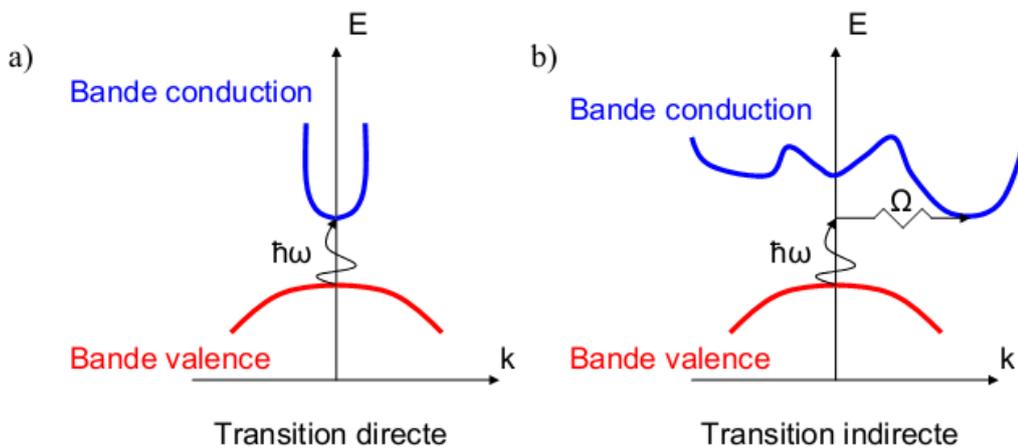
avec  $k$  : constante de Boltzmann,  $T$  la température et  $E_F$  le niveau de Fermi. Ce dernier est défini comme le niveau d'énergie auquel la probabilité d'occupation est  $1/2$  à une température donnée. Son évolution est tracée sommairement en (Figure I.2-b) pour un semi-conducteur intrinsèque (à noter qu'habituellement celle-ci est tracée avec  $F(E)$  en fonction de  $E$ , ici elle est tracée avec les axes inversés pour améliorer la lisibilité avec les autres figures) [2].



**Figure I.2 : Représentation schématique d'un semi-conducteur intrinsèque (a) schéma de bande à la température du zéro absolu, (b) statistique de Fermi Dirac permettant de connaître l'occupation des bandes, (c) Densité de porteurs à température ambiante, il existe autant de trous que d'électrons, (d) Schéma de bande à température différente du zéro absolu [2].**

Il existe un second procédé permettant la création de paires électrons/trous au sein du semi-conducteur. Ce phénomène est l'absorption optique. L'absorption des photons incidents est possible lors de la mise sous éclairage d'un matériau semi-conducteur pour une énergie incidente supérieure au gap du matériau. Ce phénomène est indépendant de l'ionisation thermique mais la structure de bandes conditionnera l'intensité de cette absorption. Cette dernière sera intense pour les processus directs  $\vec{\Delta k} = \vec{0}$  ou beaucoup plus faible et

dépendante de la température pour les processus indirects  $\vec{\Delta K} \neq \vec{0}$  assistés par les phonons du réseau (Figure I.3) [2].



**Figure I.3: (a) processus direct sans changement de vecteur d'onde, (b) processus indirect, avec intervention d'un photon et un phonon [2].**

#### I.4.2. Le dopage des semi conducteurs (les semiconducteurs extrinsèques)

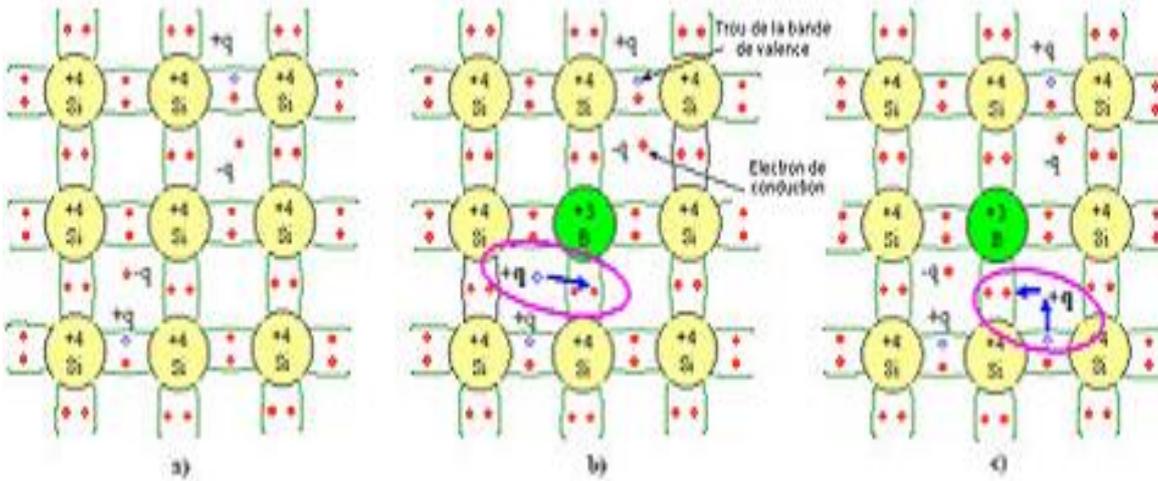
La formation des bandes interdites étant due à la régularité de la structure cristalline, toute perturbation de celle-ci tend à créer des états accessibles à l'intérieur de ces bandes interdites, rendant le gap plus « perméable ». Le dopage consiste à implanter des atomes correctement sélectionnés (nommés « impuretés ») à l'intérieur d'un semiconducteur intrinsèque afin d'en contrôler les propriétés électriques.

La technique du dopage augmente la densité des porteurs à l'intérieur du matériau semiconducteur. Si elle augmente la densité d'électrons, il s'agit d'un dopage de type N. Si elle augmente celle des trous, il s'agit d'un dopage de type P. Les matériaux ainsi dopés sont appelés semiconducteurs extrinsèques [3].

##### ➤ Semiconducteurs de type P

Un semiconducteur type P est un semiconducteur intrinsèque (ex: silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type accepteurs (ex: Bohr B). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles acceptent un électron de la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semiconducteur [3].

La figure I.4 met en évidence qu'un semiconducteur dopé P à une densité d'électrons  $n$  plus faible et une densité de trous  $p$  plus élevée que le même semi conducteur pris dans sa configuration intrinsèque. On dit alors que les électrons sont les porteurs minoritaires et les trous, les porteurs majoritaires [3].



**Figure I.4: Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semiconducteur silicium (Si) dopé P par du Bohr (B). a) Cas du semiconducteur intrinsèque b) Sur la base de la représentation a), l'impureté (B) accepte un électron de conduction en baissant la densité d'électrons  $n$ . c) Sur la base de la représentation b), l'impureté (B) accepte un électron de valence en augmentant la densité de trous  $p$  [3].**

Pour les semiconducteurs extrinsèques, la densité de dopant est toujours très supérieure à densité de porteurs intrinsèques  $N_A \gg n_i$ . Dans le cas d'un type *P*, la densité de trous est donc proche de celle du dopant accepteur  $N_A$ . La relation étant toujours vérifiée, nous obtenons pour les densités de porteurs :

$$p = N_A \quad \text{I.2}$$

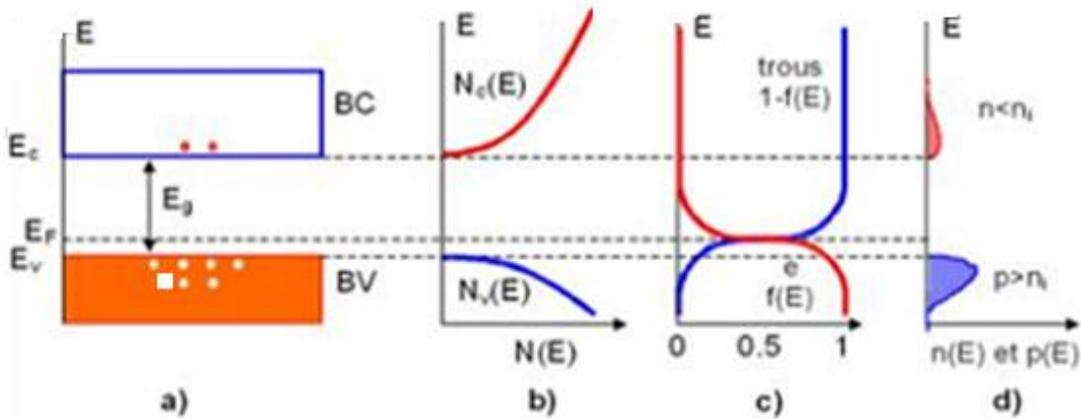
$$n = \frac{n_i^2}{N_A} \quad \text{I.3}$$

Le niveau de Fermi pour un semiconducteur type P ou potentiel chimique est alors :

$$E_{Fp} = E_v + KT \ln \frac{N_v}{N_A} \quad \text{I.4}$$

Ainsi, plus la densité d'accepteurs est élevée plus le niveau de Fermi se rapproche de la bande de valence. A la limite si  $N_A = N_v$  le niveau de Fermi entre dans la bande de valence, on dit alors que le semiconducteur est dégénéré [3].

La figure I.5 donne graphiquement le bilan électronique pour un semi conducteur dopé P

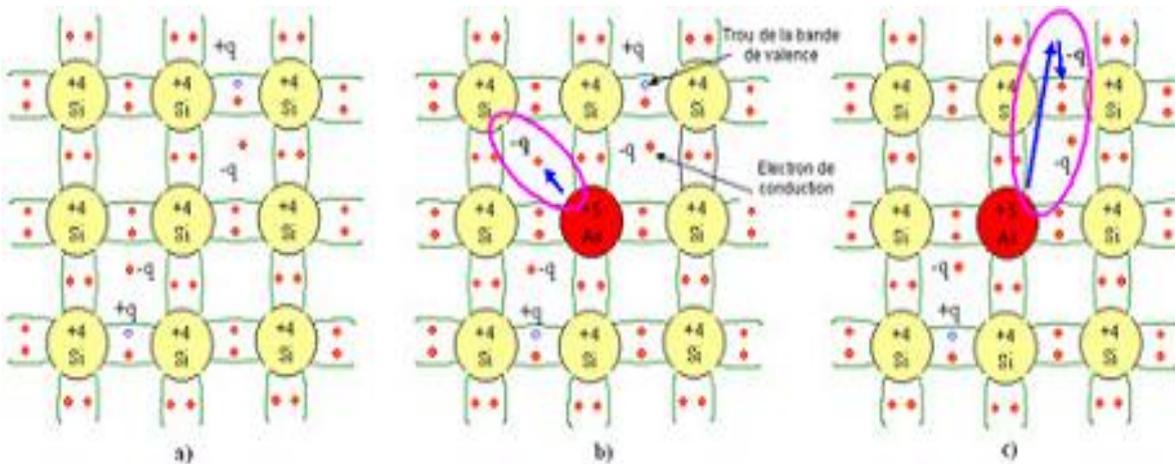


**Figure I.5: Semiconducteur type P. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'états énergétique. c) Distributions de Fermi Dirac d) Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs n et p correspondent aux surfaces hachurées) [3].**

### ➤ Semiconducteurs de type N

Un semiconducteur type N est un semiconducteur intrinsèque (ex : silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type donneurs (ex : arsenic As). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles donnent un électron à la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi conducteur [3].

La figure I.6 met en évidence qu'un semiconducteur dopé N a une densité d'électrons n plus élevée et une densité de trous p plus faible que le même semi conducteur pris dans sa configuration intrinsèque. On dit alors que les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous, les porteurs minoritaires [3].



**Figure I.6 : Représentation schématique des liaisons électroniques pour le semiconducteur silicium (Si) dopé P par de l'arsenic (As). a) Cas du semiconducteur intrinsèque b) Sur la base de la représentation a), l'impureté (As) donne un électron de conduction en augmentant la densité d'électrons n. c) Sur la base de la représentation b), l'impureté (As) donne un électron de conduction en baissant la densité de trous p [3].**

Par analogie avec les semiconducteurs de type P et en notant  $N_D$  la densité de donneurs, les densités de porteurs pour un semiconducteur de type N sont :

$$n = N_D \quad \text{I.5}$$

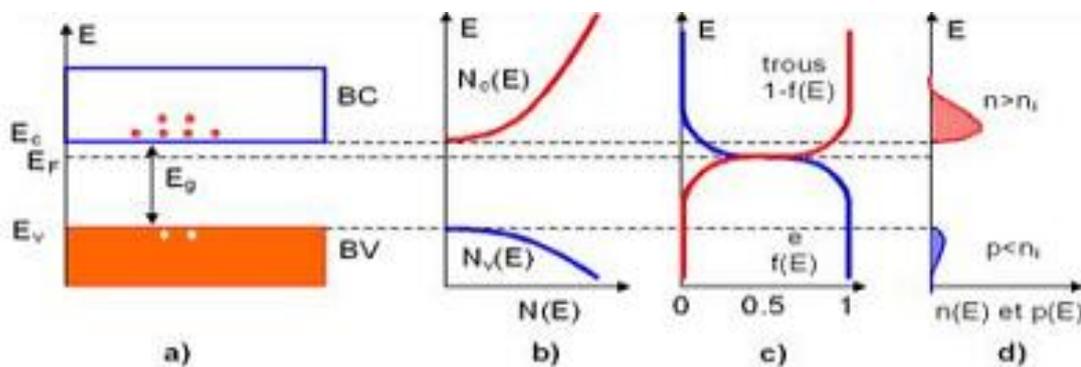
$$p = \frac{n_i^2}{N_D} \quad \text{I.6}$$

Le niveau de Fermi pour un semiconducteur type N est alors :

$$E_{F_n} = E_c + KT \ln \frac{N_c}{N_D} \quad \text{I.7}$$

Ainsi, plus la densité des donneurs sont élevée, plus le niveau de Fermi se rapproche de la bande de conduction. A la limite si  $N_c = N_D$  le niveau de Fermi entre dans la bande de conduction, on dit alors que le semiconducteur est dégénéré [3].

La figure I.7 donne graphiquement le bilan électronique pour un semi conducteur dopé N



**Figure I.7: Semiconducteur dopé N. a) Diagramme des bandes d'énergie b) Densités d'état énergétique c) Distributions de Fermi Dirac d) Densités énergétiques de porteurs (les densités de porteurs  $n$  et  $p$  correspondent aux surfaces hachurées) [3].**

## I.5. La conductivité

Une bonne conductivité thermique est nécessaire dans le substrat semiconducteur, d'une part pour réduire la température du substrat par dissipation, et d'autre part pour assurer une température uniforme dans tout le substrat, afin d'améliorer la similitude du comportement des dispositifs de nature identique mais placés dans différentes positions dans le substrat semiconducteur [4].

L'électronique d'état solide a pris le relais avec succès, grâce à sa plus haute densité d'intégration et à sa plus faible consommation d'énergie, ce qui ne rendait plus nécessaire aucune considération d'ordre thermique. Mais les technologies des circuits intégrés sur le silicium ont fortement évolué en densité d'intégration, et densité de puissance dissipée, tout en conservant le même type de substrat semiconducteur [4].

De même, des nouveaux matériaux semi-conducteurs de plus large bande interdite et de plus importante conductivité thermique, tels que le SiC et le Diamant, sont étudiés pour des applications à plus de

300°C. En ce qui concerne la gestion de la chaleur dans les circuits intégrés analogiques et mixtes, quelques techniques d'implémentation peuvent être appliquées afin de minimiser les gradients et les transitoires thermiques autour des structures les plus sensibles [4].

Les semi-conducteurs occupent un grand intervalle car leur conductivité dépend sensiblement de la température, mais elle varie surtout très fortement en fonction de la présence de petites quantités d'impuretés bien choisies. Dans un monocristal de silicium intrinsèque, à la température ambiante quelques électrons ( $1,5 \cdot 10^{10}$  électrons pour  $5 \cdot 10^{22}$  atomes dans un  $\text{cm}^3$ ) sont excités thermiquement depuis la bande de valence vers la bande de conduction, et les électrons libres et les trous positifs ainsi créés contribuent ensemble à la conductivité du matériau, mais celle-ci reste assez faible. Le courant dans un semiconducteur étant en général la somme de celui dû au déplacement des électrons libres, et de celui dû au déplacement des trous, la conductivité  $\sigma$  est reliée à la densité des porteurs  $n$  et  $p$ , et à leur mobilité  $\mu$  par la relation [4] :

$$\sigma(T) = q(n\mu_n(T) + p\mu_p(T)) \quad \text{I.8}$$

$q$  : est la charge de l'électron.

$n$  et  $p$  sont les densités des électrons et des trous, et  $\mu$  est le coefficient qui, à une température donnée, relie la vitesse de dérive moyenne du porteur au champ électrique appliqué.

## I.6. Courants dans le semiconducteur

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:

$$J_{cn} = qn\mu_n E \quad \text{I.9}$$

$$J_{cp} = qp\mu_p E \quad \text{I.10}$$

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 [5] :

$$J_{tot} = q(n\mu_n + p\mu_p)E = \sigma E \quad \text{I.11}$$

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

$$\sigma(T) = q(n\mu_n(T) + p\mu_p(T)) \quad \text{I.12}$$

$$\rho(T) = \frac{1}{q(n\mu_n(T) + p\mu_p(T))} \quad \text{I.13}$$

Considérons un semiconducteur dopé dont la concentration en trous varie suivant un axe  $x$ . La densité de courant de diffusion en un point d'abscisse  $x$  est [5]:

$$J_{Dp} = qD_p \frac{dp(x)}{dx} \quad \text{I.14}$$

$$D_p = \mu_p \frac{kT}{q} \quad \text{I.15}$$

$D_p$  : 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 [5]:

$$J_{Dp} = qD_n \frac{dn(x)}{dx} \quad \text{I.16}$$

$$D_n = \mu_n \frac{KT}{q} \quad \text{I.17}$$

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 [5] :

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx} \quad \text{I.18}$$

$$J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx} \quad \text{I.19}$$

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 [5]:

$$J_{tot} = J_n + J_p \quad \text{I.20}$$

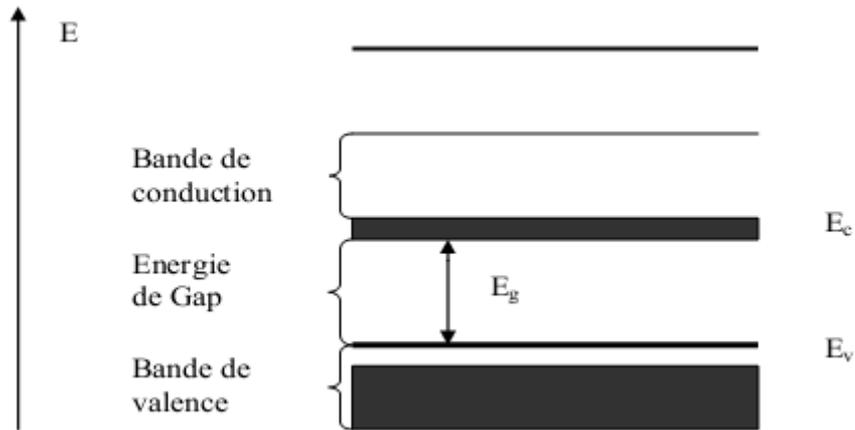
Les constantes  $D_p$  et  $D_n$  sont liées aux mobilités  $\mu_n$  et  $\mu_p$  par la relation d'Einstein [5]:

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n} = \frac{KT}{q} \quad \text{I.21}$$

## I.7. Bandes d'énergie

Bien que les électrons d'un atome isolé aient des niveaux d'énergie permis bien définis, le comportement de ces électrons dans un réseau cristallin périodique est différent. Si la distance entre les atomes est suffisamment petite, comme dans le cas du réseau cristallin du silicium, la présence des atomes voisins génère une sorte d'interférence entre les niveaux permis de chaque atome. Cela entraîne une multitude quasi continue d'états autour de chaque niveau permis de l'atome individuel. Cet ensemble d'états, très proches entre eux, est plutôt considéré alors comme une bande d'énergie permise, avec une densité d'états associée.

Les niveaux d'énergie des électrons de valence et le niveau d'énergie d'ionisation génèrent ainsi deux bandes d'énergies permises particulièrement intéressantes, la bande de valence et la bande de conduction, séparées par une bande dépourvue de niveaux permis, nommée bande interdite (Figure I.8). La particularité de ces bandes permises tient au fait que les électrons peuvent circuler librement dans toute la maille cristalline et ainsi générer des courants de conduction électrique (s'agissant d'électrons partagés par les atomes du réseau cristallin).



**Figure 1 .8 : Diagramme des bandes d'énergie des semiconducteurs [6].**

A des températures très basses, la bande de conduction se trouve vide d'électrons et la bande de valence est complètement occupée, car l'énergie thermique n'est pas suffisamment importante pour ioniser les atomes du réseau cristallin. A des températures normales un bon nombre des atomes ionisés ont déjà cédé leurs électrons à la bande de conduction, dans laquelle ils participent à la conduction électrique avec une charge négative.

La bande de valence, même quasiment pleine, présente un nombre de niveaux inoccupés (trous) égal au nombre d'électrons dans la bande de conduction (dans le cas d'un semi conducteur intrinsèque); ces niveaux inoccupés peuvent être occupés par un électron de valence d'un atome voisin et ainsi se déplacer dans le réseau cristallin, et participer à la conduction électrique comme s'ils étaient des particules chargées positivement.

Au voisinage de chacune des limites  $E_v$  et  $E_c$ , respectivement de la bande de conduction et de la bande de valence, la densité d'états permis  $N(E)$  peut être estimée avec l'approximation parabolique suivante [6] :

$$N_v(E) = K_v (E_v - E)^{1/2} \quad 1.22$$

$$N_c(E) = K_c (E - E_c)^{1/2} \quad 1.23$$

$K_c$  et  $K_v$  étant des constantes pratiquement indépendantes de la température.

## I.8. Le silicium

Le silicium fait partie de la colonne IV de la classification périodique de Mendeleïev, il dispose de 4 électrons de valence. Il s'agit d'un semiconducteur avec un gap indirect de 1.12 eV.

Ses caractéristiques spécifiques ainsi que son abondance (deuxième élément de la croûte terrestre 28%), en font l'élément par excellence de la microélectronique et du photovoltaïque.

### I.8.1. Quelques propriétés du silicium

De par ses multiples applications, le silicium est un des matériaux aux propriétés les mieux connues. Même le comportement de la plupart des impuretés dans le silicium a fait l'objet de très nombreuses publications. Les efforts de recherche actuels portent davantage sur l'interaction impureté–impureté, impureté–défaut dans le silicium et la passivation de ces imperfections [7]. Le tableau I.2 présente quelques propriétés du Si.

Masse volumique $\rho$ (à 300K)	Masse volumique $\rho$ (1687 K)	Gain en densité Transition liquide-solide	Conductivité thermique k (300K)	T <sub>f</sub> Température de fusion	Gap (300 K)
2.329 g/cm <sup>3</sup>	2.51 g/cm <sup>3</sup>	+ 9.1%	1.5 W.cm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	1687 K	1.126 Ev

**Tableau I.2. Quelques propriétés du silicium [7].**

### I.8.2. Les impuretés dans le silicium

Les impuretés peuvent occuper différents sites dans le réseau du silicium, des sites interstitiels (généralement pour les impuretés métalliques), des sites substitutionnels (pour les dopants B, P, Al...). Les impuretés peuvent s'associer entre elles pour former soit des complexes soit des précipités si localement leur concentration est supérieure à la limite de solubilité .

Les études sur l'activité électrique des impuretés dans le silicium cristallin divise les impuretés en quatre classes :

- Les dopants (B, P, Al,...).
- Les diffuseurs rapides (Fe, Cr, Cu, ...).
- Les diffuseurs lents (Al, Ti, Au, ...).
- Les éléments légers (O, C, N, ...).

### I.9. Arsenic de Gallium (GaAs)

L'Arsenic de Gallium (GaAs) a été reconnu depuis longtemps comme étant un matériau très favorable pour des applications photoniques grâce a ses propriétés importantes dont on cite une bande interdite directe (1.43 eV) et une longueur de diffusion des porteurs minoritaires de l'ordre de 2-3 $\mu$ m et une mobilité plus importante.

L'Arsenic de Gallium (GaAs) est un semi conducteur composé d'un mélange de deux éléments gallium(Ga) et arsenic (As). Le gallium (Ga) est un élément chimique métallique de numéro atomique 31. On le trouve en petites quantités dans certaines variétés de blende, de bauxite, de pyrite, de magnétite et de kaolin. On obtient le gallium comme sous produits de métallurgie de Zinc et des bauxites. Le gallium est

chimiquement proche de l'aluminium : tous deux forment des sels et des oxydes dans les quels le métal est trivalent. Ils forment également des composés monovalents et divalents [8].

L'arsenic, est un élément semimétallique solide, extrêmement toxique, de numéro atomique 33. Il appartient au groupe 15 de la classification périodique. L'arsenic n'est pas rare, mais il est toxique.

L'utilisation d'arsenic de gallium en piles solaires s'était développée synergiquement avec son utilisation dans les diodes électroluminescentes, les lasers, et d'autres dispositifs optoélectroniques [8].

### I.9.1. Structure de bande d'énergie de GaAs

Le GaAs est un semi conducteur III.V, qui comprend aussi 8 électrons par cellule unité (3 provenant du Ga et 5 d'As). Sa structure a un nombre égal de Ga et As distribués sur un réseau de type diamant. Il possède donc, comme le Si et le Ge, 8 bandes dérivées des orbitales SP 3, dont 4 sont entièrement remplies. Sa structure de bande est donnée dans la Figure (I.9). on remarque que dans ce cas le minimum de la bande de conduction est situé au centre de la zone de Brillouin. C'est un semiconducteur à gap directe situé au point  $\Gamma$ .

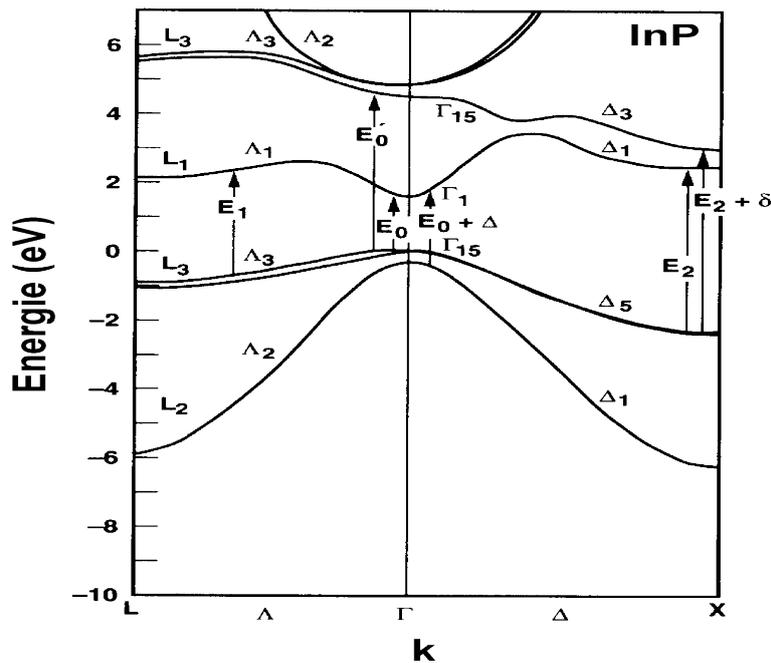


Figure I.9 : Structure de bande de GaAs [8].

### I.9.2. Propriétés électroniques du GaAs

La structure de bande directe du GaAs, lui confère des propriétés électroniques intéressantes:

-Il se prête facilement à la réalisation de diodes Schottky de hauteur de barrière élevée à partir de métaux divers qui rendent possible la fabrication de transistors à effet de champ à jonction métal-semi conducteur (MESFET).

-Il permet, par l'építaxie d'un composé ternaire (par exemple Ga-AlAs de largeur de bande différente), de réaliser des composants nouveaux tels que le transistor à effet de champ à gaz d'électrons bidimensionnel (HEMT), ou encore les transistors bipolaires à hétérojonctions HBT.

-Les propriétés de transport électronique du GaAs sont remarquables : mobilité très élevée ( $8000 \text{ cm}^2 \text{v}^{-1} \text{s}^{-1}$  pour un matériau peu dopé), vitesse de saturation élevée ( $2 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$ ) obtenue pour un champ électrique trois fois plus faible que pour le silicium. Ces propriétés garantissent l'obtention de vitesses de commutation élevées sous de faibles consommations (Tableau I. 3).

-De par sa grande largeur de bande interdite, le GaAs peut être obtenu sous forme d'un semi-isolant de haute résistivité ( $10^7$  à  $10^9 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$ ). L'építaxie ou l'implantation de la couche active dans ce semi-isolant, permet d'assurer l'isolation interdispositif et ainsi, d'offrir des capacités parasites entre les dispositifs et le plan de masse extrêmement faibles

Nom	Symbole	Unités	Valeur
Structure cristalline			Zinc Blende
Paramètre cristallin	A	$\text{A}^\circ$	5,63
Masse molaire	M	$\text{g.mole}^{-1}$	144,63
Masse molaire	P	$\text{g.cm}^{-3}$	5,32
Nombre atomes par unité de volume	N	$\text{cm}^{-3}$	$4,4 \cdot 10^{22}$
Hauteur de la Bande Interdite	$E_g$	eV	1,42
Densité effective d'états dans la Bande de conduction	$N_c$	$\text{cm}^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{17}$
Densité effective d'états dans la Bande de valence	$N_v$	$\text{cm}^{-3}$	$7,0 \cdot 10^{18}$
Mobilité des électrons	$\mu_n$	$\text{cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$8,5 \cdot 10^3$
Mobilité des trous	$\mu_p$	$\text{cm}^2 \cdot \text{v}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$4,0 \cdot 10^2$
Vitesse de saturation des électrons	$v_{sn}$	$\text{cm.s}^{-1}$	$1 \cdot 10^7$
Constante diélectrique relative	$\epsilon_r$		12.9
Champ de claquage	$E_{av}$	$\text{kV} \cdot \text{cm}^{-1}$	$3 \cdot 10^2$
Affinité électronique	$X_s$	eV	4.07
Chaleur spécifique	C	$\text{J.g}^{-1} \text{K}^{-1}$	0.35
Température de fusion	$T_f^\circ$	C	1240
Conductivité thermique	$A^\circ$	$\text{W.cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	0.46

**Tableau I.4: Les propriétés de GaAs à 300 K [9].**

### I.9.3. Structure cristalline du semi conducteur GaAs

Le semiconducteur GaAs possède la même structure que la blende ; il cristallise dans le système cubique. La maille élémentaire comporte quatre molécules du composé GaAs, réparties selon la symétrie cubique du groupe d'espace  $F\bar{4}3m$ .

Les atomes occupent les sites cristallographiques suivants (Figure I.10)

Les atomes du type III en :  $(0, 0,0)$  ;  $(0,1/2,1/2)$  ;  $(1/2, 0,1/2)$  ;  $(1/2,1/2,0)$ . et les atomes du type V en :  $(1/4,1/4,1/4)$  ;  $(1/4,3/4,1/4)$  ;  $(3/4,1/4,1/4)$  ;  $(1/4,3/4,3/4)$ . Chaque atome est entouré de quatre atomes de l'autre espèce, placés aux sommets d'un tétraèdre.

Cette structure est dite du type zinc blende en référence à la cristallisation du composé, ZnS dans cette configuration cubique [10].

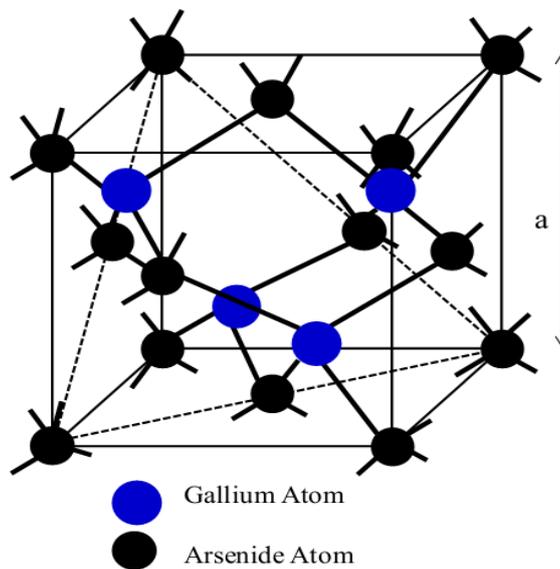


Figure I.10: Structure cristalline du semiconducteur GaAs [10].

# Chapitre II

## Les diodes

### II.1. Introduction

Le travail présenté dans ce mémoire est la caractérisation électrique (courant-tension et capacité-tension) de deux types de dispositifs : des diodes Schottky en Arséniure de gallium fabriquées à l'université de Nottingham [11] et des photodiodes PIN commerciales (BPX65 : Annexe B) en Silicium cristallin. Donc ces les propriétés fondamentales de ces deux structures sont discutées dans ce chapitre.

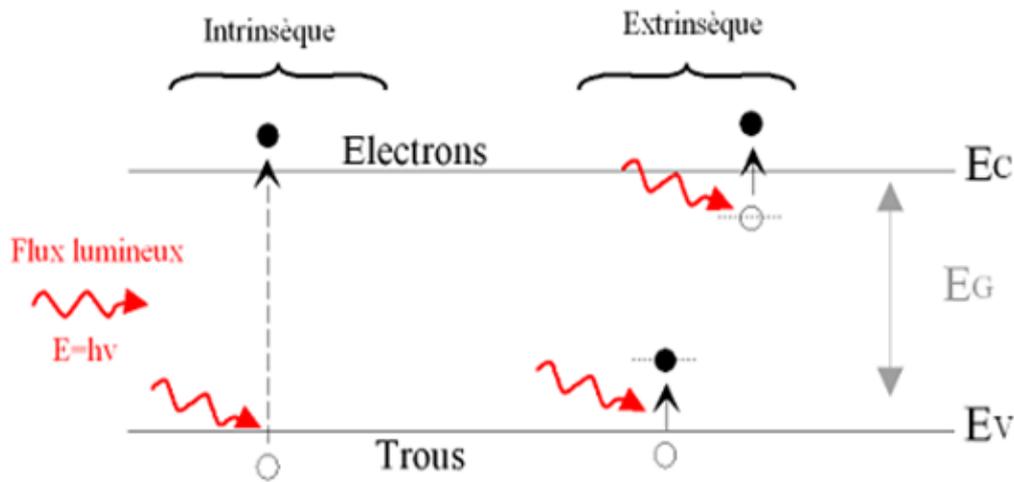
### II.2. La définition du photodétecteur

Le photodétecteur est un composant à base de semi conducteur. Il absorbe de l'énergie optique et la convertit en énergie électrique, qui se manifeste en photocourant. Il est très important dans la transmission optique et les systèmes de mesure. Dans cette section nous présentons quelques généralités sur la photodétection, en se basant sur ses principes de base. Nous exposons aussi la théorie générale des photodétecteurs, avec les équations qui définissent les paramètres déterminant les performances du photodétecteur. Nous présentons les différents types de potodétecteurs.

La photodétection représente une fonction qui trouve sa place dans un grand nombre de systèmes professionnels ou grand public. En 1905 Einstein a introduit la notion de photon en affirmant que lors des phénomènes d'émission ou d'absorption, la lumière se présente sous la forme de quantum d'énergie. Ces quanta sont assimilables à des particules et il leur a été donné le nom de photon [12]. La photodétection est un phénomène d'absorption dans un matériau de l'énergie lumineuse portée par les photons qui est transformée en énergie électrique portée par les électrons et les trous .

#### II.2.1. Le Principe de la photodétection

Le principe de base de la photodétection est illustré par la Figure II.1 dans le cas d'un semiconducteur intrinsèque et extrinsèque. L'absorption d'un photon possédant une énergie au moins égale à la bande interdite  $E_g$  caractérisant le semi conducteur, permet de libérer un électron de la bande de valence  $E_v$  à la bande de conduction  $E_c$ .



**Figure II.1 Principe d'absorption de la lumière dans le cas de semi conducteurs intrinsèque et extrinsèque.**

Tout d'abord, le photon doit posséder une énergie  $E_{\text{photon}}$  égale ou supérieure à la hauteur de la bande d'énergie interdite  $E_g$  du semi conducteur pour faire passer l'électron de la bande de valence à la bande de conduction. Cela implique une longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  au-delà de laquelle le matériau devient transparent à ce rayonnement.  $\lambda_c$  est déterminée par l'énergie de bande interdite  $E_g$  du semi-conducteur selon la relation suivante :

$$E_{\text{photon}} = \frac{hc}{\lambda} \geq E_g \Rightarrow \lambda_c = \frac{hc}{E_g} \quad \text{II.1}$$

Où  $h$  est la constante de Planck,  $h = 6,6262 \cdot 10^{-34}$  Js,  $\lambda$  la longueur de l'onde dans le matériau semi-conducteur et  $c$  la célérité,  $c = 2,997925 \cdot 10^8$  ms<sup>-1</sup>. Le mécanisme de la photodétection est généré donc par une transition optique entre deux ensembles de niveaux quantiques.

### II.2.2. Les Paramètres d'un photodétecteur

Un photodétecteur est un composant semi-conducteur ayant la capacité de détecter un rayonnement du domaine optique et de le transformer en signal électrique. Les principaux paramètres qui définissent le fonctionnement d'un photodétecteur sont le coefficient de réponse (sensibilité), le gain, le rendement quantique, la bande passante, la puissance équivalente de bruit et la détectivité.

Le coefficient de réponse  $R_i$  lie le photocourant  $I_{ph}$  à la puissance lumineuse incidente  $P_{opt}$  par la relation :

$$R_i = \frac{I_{ph}}{P_{opt}} \quad \text{II.2}$$

Le flux de photon arrivant sur la surface du semi-conducteur est défini par le nombre de photon atteignant la surface active par unité de temps à une longueur d'onde donnée. Il est exprimé par la relation suivante :

$$\Phi = P_{opt} \frac{\lambda}{hc} \quad \text{II.3}$$

L'efficacité quantique ou rendement quantique  $\eta$  est généralement défini comme le rapport : nombre de paires électron-trou générées sur le flux le photon incident. Le taux de génération des paires électron-trou par unité de temps est donné par :

$$G = \eta\Phi = \eta P_{opt} \frac{\lambda}{hc} \quad \text{II.4}$$

Si on considère le gain photoélectrique  $g$  qui correspond au nombre de porteurs détectés par rapport au nombre des paires électron-trous photogénérés, le photocourant est donné alors par la relation suivante :

$$I_{ph} = qgG = qg\eta \frac{\lambda}{hc} \quad \text{II.5}$$

$$R_i = q \frac{\lambda\eta}{hc} g \quad \text{II.6}$$

Où  $\lambda$  : longueur d'onde,  $h$  : Constante de Planck,  $c$  : Vitesse de la lumière,  $q$  : Charge de l'électron et  $g$  : le gain du courant photoélectrique. Les équations de base pour analyser la performance du détecteur sont :

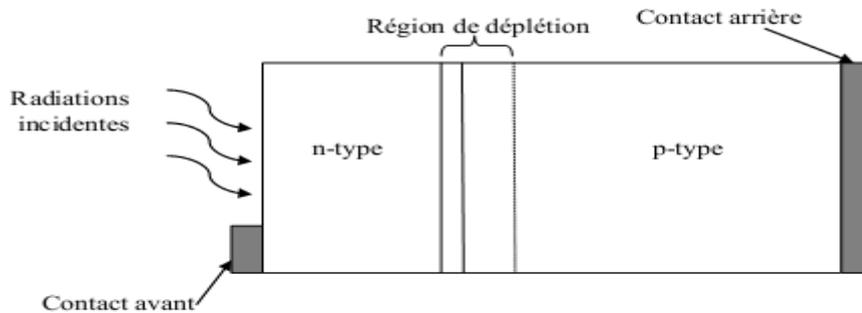
- La densité de courant pour les électrons.
- La densité de courant pour les trous.
- L'équation de continuité pour les électrons.
- L'équation de continuité pour les trous.
- L'équation de Poisson.

### II.2.3. Les différents types des photodétecteurs

Dans cette partie nous présentons brièvement les différents types de photodétecteurs ainsi que les principales notions physiques à l'origine de leur fonctionnement.

#### II.2.3.1. La photodiode PN classique

Une photodiode classique est une simple jonction PN polarisée en inverse afin d'obtenir une grande zone de charge d'espace ou zone de déplétion favorisant la photodétection. Le fonctionnement de la photodiode est illustré dans la figure (II.2). Les photons incidents, avec une énergie supérieure à celle de la bande interdite, sur la surface du composant créent des paires électron-trou dans tout le volume du matériau. La diffusion des électrons et des trous générés atteignent la ZCE de la jonction avec une longueur de diffusion adéquate. Cependant, sous l'effet d'un champ électrique fort, les paires électron-trou sont séparées et les porteurs minoritaires sont accélérés dans un côté pour devenir des porteurs majoritaire dans l'autre côté, participant ainsi à la génération du photocourant. Ils peuvent se recombiner au cours de leur déplacement.



**Figure II .2 : La photodiode PN.**

La première évolution des photodétecteurs au début des années 60, s'est tournée vers l'augmentation de la zone d'absorption à l'aide d'une couche supplémentaire non dopée ou faiblement dopée, pour accroître la sensibilité : cette évolution a donné naissance à la photodiode PIN.

### II.2.3.2. La photodiode PIN

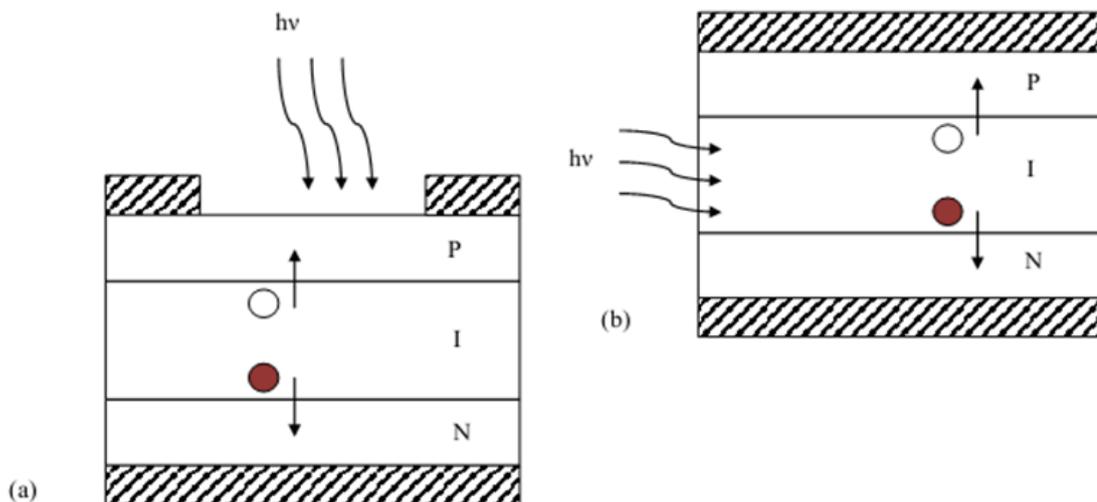
La photodiode est un composant optoélectronique ayant deux électrodes et une caractéristique électrique non symétrique. Elle est en général polarisée en inverse (sens bloquant) et utilisée pour convertir des flux optiques en courant électriques. L'appellation PIN fait référence aux dopages des trois couches de semi conducteurs utilisées dans leur partie active respectivement de type P, intrinsèque I et de type N, qui vise à optimiser ses caractéristiques par rapport à celles des photodiodes à simples jonction PN [13]. La figure II.3 montre les dispositions possibles pour le flux optiques et le courant électrique. La géométrie colinéaire (flux optique et transport de charges colinéaires) présentée dans la figure II.3.a est employée le plus fréquemment. Elle est prise comme type de référence pour l'analyse des caractéristiques des photodiodes. La figure II.3.b représente la géométrie orthogonale (flux optique et transport de charges orthogonaux).

#### ➤ La photodiode PIN à éclairage vertical

L'idée de cette structure est d'augmenter artificiellement la zone de charge d'espace et donc la zone d'absorption principale de la photodiode, sous une polarisation inverse suffisante, toute la zone intrinsèque est soumise à un fort champ électrique quasiuniforme et ainsi les porteurs photogénérés atteignent rapidement la vitesse de saturation. Cette structure de photodiode a très rapidement été utilisée comme démodulateur optique microonde [14]. Dans ce type de composant, des temps de réponse très brefs sont recherchés pour pouvoir permettre des montées en débit pour les communications. On remarque que dans les premières structures PIN, certains porteurs photogénérés étaient soumis au phénomène de diffusion dans certaines zones. Or, la diffusion est un phénomène très lent qui réduit la bande passante et donc est contraire aux applications optique-microondes. De plus la réponse en fréquence des photodiodes à zone de déplétion est limitée principalement par les effets de temps de transit des porteurs [15] et de la capacité de jonction de la diode.

#### ➤ La photodiode PIN à éclairage latéral

Les structures à éclairage latéral permettent ce découplage optique-électrique. Elles permettent d'augmenter la bande passante tout en gardant une grande sensibilité, par élimination de la dépendance du rendement quantique avec l'épaisseur de la zone d'absorption.

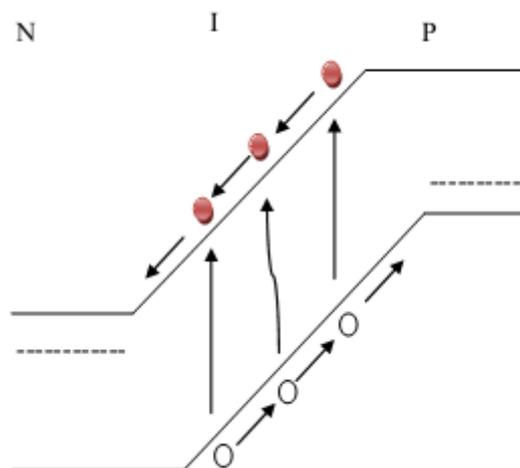


**Figure II.3 : Géométrie schématisques de photodiodes PIN : flux optique et transport de charges (a) colinéaires et (b) orthogonaux [15].**

### II.2.3. 3. La photodiode à avalanche

Les signaux optiques, après propagation dans une fibre optique, sont généralement très faibles, par conséquent, le signal électrique délivré par les photodiodes requiert souvent une amplification. Le but de la photodiode à avalanche est d'obtenir une amplification interne du photocourant et ainsi augmenter la réponse du photodétecteur. Dans une photodiode à avalanche on obtient un champ fort en appliquant une tension inverse très importante à une structure pin (figure II.4). Il y a trois sources du courant traversant la diode :

- La génération primaire (par absorption d'un photon)
- La génération par impact due aux électrons
- La génération par impact due aux trous



**Figure II.4 Effet avalanche : une paire électron-trou photocréée génère d'autres paires par ionisation par impact.**

La caractéristique principale de la photodiode à avalanche est son coefficient de multiplication  $M$  qui dépend des coefficients d'ionisation des électrons  $\alpha_n$  et des trous  $\alpha_p$ , il est décrit par l'équation [16] :

$$M = \frac{1}{L} \frac{\exp((\alpha_n - \alpha_p)L) - 1}{\alpha_n - \alpha_p \exp((\alpha_n - \alpha_p)L)} \quad \text{II.7}$$

Ce coefficient de multiplication peut atteindre  $10^4$  et permet à la photodiode à avalanche d'être très utile pour la détection de faibles signaux, notamment en sortie de fibre optique. Les inconvénients de ce composant sont liés à sa réalisation difficile, à la tension élevée nécessaire à la condition d'avalanche et à la nature aléatoire du mécanisme de gain qui est un phénomène bruyant. Signalons aussi que pour les systèmes de télécommunications par fibre optique modernes, l'intérêt de la photodiode à avalanche a tendance à diminuer à cause de l'apparition des amplificateurs à fibre dopée erbium. Les photodiodes à avalanche atteignent des fréquences de coupure relativement équivalentes à celles des photodiodes PIN classiques. On peut citer les débits à 17GHz à gain unitaire, publiés par Kagawa en 1993, avec une structure en InGaAs pour la zone d'absorption et InGaAsP-InAlAs pour la zone de multiplication. Elle est illuminée par la face arrière à  $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$ , avec un rendement quantique de 74% et un produit gain-bande maximum de 110 GHz avec une bande passante d'environ 10 GHz. Campbell présenta une structure avec une zone de multiplication en Si cette fois, éclairée sur la gamme  $\lambda = 1,3, 6 \mu\text{m}$ , qui atteignait une fréquence de coupure supérieure à 10 GHz de gain unitaire et un rendement de 42%. Le produit gain-bande était estimé à environ 400GHz [17].

#### II.2.3.4. Le photodétecteur MSM

La structure MSM (Métal-Semiconducteur-Métal) est une structure constituée de deux électrodes Schottky, qui souvent s'interpénètrent sous la forme d'un peigne interdigité, laissant entre deux contacts une surface libre de semi conducteur qui constitue la zone active destinée à absorber la lumière. Pour cette raison, chaque contact a une caractéristique courant-tension similaire à celle d'une jonction classique, le photodétecteur MSM se comporte comme deux diodes en série placées en inverse l'une par rapport à l'autre. Sous polarisation électrique, l'une des diodes étant forcément en inverse, le courant d'obscurité passant à travers la structure est très faible et, dans la mesure où les deux contacts Schottky sont identiques, la symétrie du composant donne lieu à une caractéristique globale I(V) symétrique où pour chaque polarisation directe ou inverse correspond un comportement de la jonction métal-semi conducteur en inverse. Si la tension de polarisation est suffisamment élevée, la zone entre les électrodes où règne un champ électrique est complètement désertée. Le principe de base de ce photodétecteur est d'absorber la lumière dans la zone active du SC en désertion afin que les paires électron-trou générées soient séparées sous l'effet de la force électrique, chaque porteur étant ensuite directement collecté par une électrode [18].

#### II.2.4. Les caractéristiques courant-tension des photodétecteurs

D'étudier les propriétés électriques des photodétecteurs, des mesures courant-tension (I-V) ont été une source-mètre et une station sous pointes cryogénique, la figure (II.5) montre les caractéristiques I-V en fonction de la température sous l'illumination UV ( $\lambda=360\text{nm}$ ) et dans l'obscurité. On peut constater une augmentation de courant inverse sous éclairage par presque deux ordre de grandeur attribué à la génération de paire électron-trou dans la jonction p-i-n. De plus, lorsque l'on descend en température, les courbes I-V se

déplacent vers une tension positive sous éclairage due à un effet de photovoltage généré dans les nonofils, ce qui est typique pour les dispositifs photovoltaïques (Al Kuhaimi,1998 ) [19]. Il faut aussi remarquer que les caractéristiques I-V sont insensibles à la lumière visible.

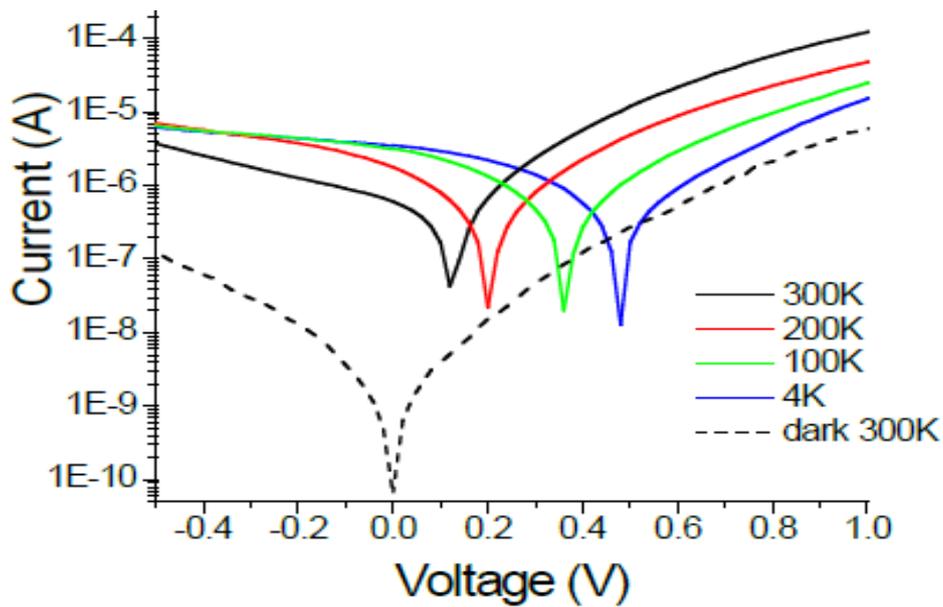
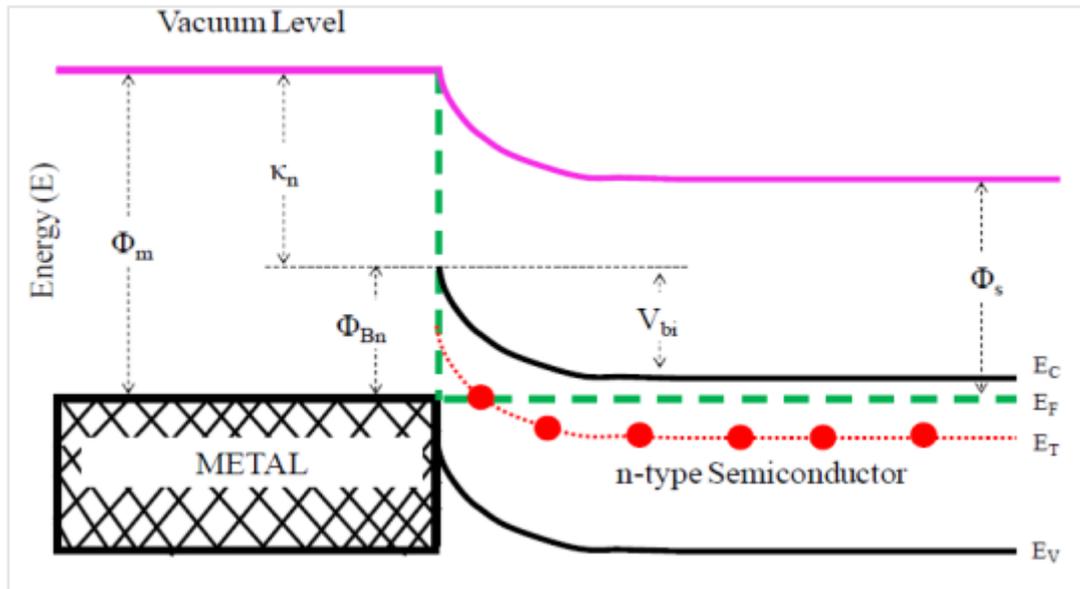


Figure II. 5: Courbe I-V dans l'obscurité et sous illumination pour les différentes températures [20].

## II.3. La diode Schottky

### II.3.1. Définition la diode Schottky

La diode Schottky exploite l'effet redresseur que peut présenter une structure métal-semiconducteur (M-SC). Une diode Schottky est formé lorsque le métal de fonction de travail ( $\Phi_m$ ) est mis en contact avec un semi-conducteur soit de type p ou de type n avec une fonction de travail  $\Phi_s$ . Quand isolé, les niveaux de Fermi-énergie dans le métal et semi-conducteurs sont différentes. Lorsque les deux matériaux sont mis en contact avec les niveaux de Fermi dans le métal et le semi-conducteur deviennent égaux en raison du flux d'électrons entre le semi-conducteur et le métal. Ce processus crée un nombre égal de charges positives (soit des trous sur le côté du semi-conducteur ou manque d'électrons coté métal). Le schéma montrant la jonction Schottky dans un état d'équilibre est illustré dans la figure II.6.



**Figure II.6 : représentation schématique de contact Schottky Situés entre le métal et semi conducteur [21].**

Les paramètres  $\Phi_m$ ,  $\Phi_s$ ,  $k_n$  et  $\Phi_{Bn}$ , sont la fonction de travail du métal (différence d'énergie entre le niveau de Fermi et le niveau de vide), la fonction de travail du semiconducteur, l'affinité électronique (énergie du bas de la bande de conduction au niveau de vide), et la hauteur de barrière (différence entre la fonction de travail du métal et de l'affinité des électrons dans le semiconducteur), respectivement. En outre,  $E_C$ ,  $E_F$ ,  $E_T$ , et  $E_V$  représentent la bande de conduction, le niveau de Fermi, l'énergie donneur d'électrons et la bande de valence, respectivement.

Dans le cas idéal, la séparation entre le métal et le semi-conducteur est très petite et est à peu près égale à la distance inter-atomique. En raison de la très petite séparation, le flux d'électrons est facile et ne rencontre aucun obstacle. La hauteur de la barrière de potentiel est donnée par [21] :

$$\Phi_{Bn} = \Phi_m - k_n \quad \text{II.8}$$

$$V_{bi} = \Phi_m - \Phi_s \quad \text{II.9}$$

En appliquant une tension externe à la diode Schottky, induit des changements de largeur de déplétion, c'est à dire qu'il augmente avec la polarisation inverse et diminue avec la polarisation directe. La jonction est dite être polarisée en sens direct lorsque la tension négative est appliquée sur le semi-conducteur de type n et positif sur le métal. Dans ce cas, le potentiel interne est réduit par la tension appliquée ( $V_F$ ) et est donné par  $(V_{BI} - V_F)$ . Ceci est dû au fait que le Fermi niveau du semi-conducteur augmente par rapport au niveau de Fermi du métal. La réduction du potentiel interne permet le flux d'électrons à travers la jonction.

Considérant que, si la jonction est polarisée en inverse en utilisant une tension ( $V_R$ ), où la tension positive est appliquée sur le semiconducteur de type n et sur le côté négatif de métal, la hausse du potentiel interne devient  $(V_{BI} + V_R)$ . Dans ce cas, le niveau de Fermi dans le semiconducteur diminue par rapport à ce du métal, ce qui se traduit par une augmentation de la courbure des bandes d'énergie dans le semiconducteur, et par conséquent une augmentation de la barrière de potentiel (potentiel interne). Ceci a pour effet de la réduction du flux d'électrons.

### II.3.2. Caractéristiques courant-tension d'une diode Schottky

Dans une diode Schottky de barrière pratique la pente de la I-V courbe dans des conditions de polarisation directe est généralement supérieure à l'unité.

Une formule semi-empirique pour prédire les caractéristiques I-V d'une diode Schottky pratique est donnée par [22] :

$$J = J_0 \left[ \exp\left(\frac{qV_a}{nK_B T}\right) - 1 \right] \quad \text{II.10}$$

Où  $J_0$  est la densité de courant de saturation donné :

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{K_B T}\right) \quad \text{II.11}$$

En vertu de condition de polarisation direct (avant) et pour  $qV_a \geq 3K_B T$ , (II.10) devient

$$J_F \approx J_0 \exp\left(\frac{qV_a}{nK_B T}\right) \quad \text{II.12}$$

#### II.3.2.1. Diode au Si

Pour les diodes Schottky au Si, le contact métallique est souvent de l'Aluminium (Al). La figure II.7 montre une diode Schottky de barrière Al / type n avec une structure planaire sur un substrat n<sup>+</sup>.

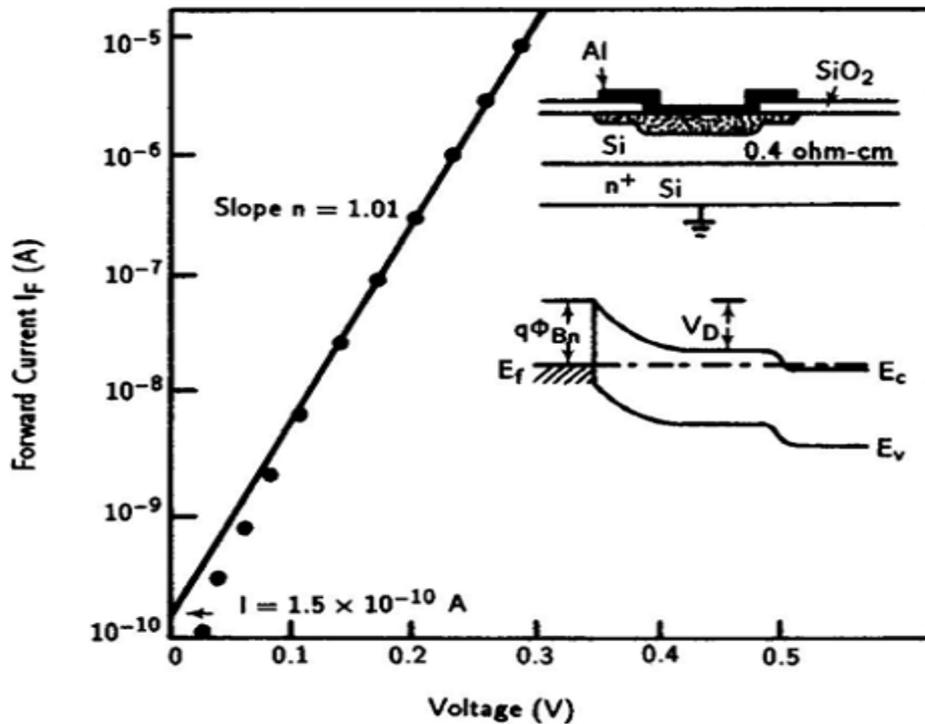


Figure II.7 : Courbe I-V et le diagramme de bande d'énergie pour une diode Schottky Al / Si de type n ayant une structure planaire [23].

La figure II.8 présente les caractéristiques inverses I-V le silicium Al/n-type Diode à barrière de Schottky avec deux résistivités différentes de substrat. Cette figure montre l'effet du dopage du substrat sur le claquage de la diode.

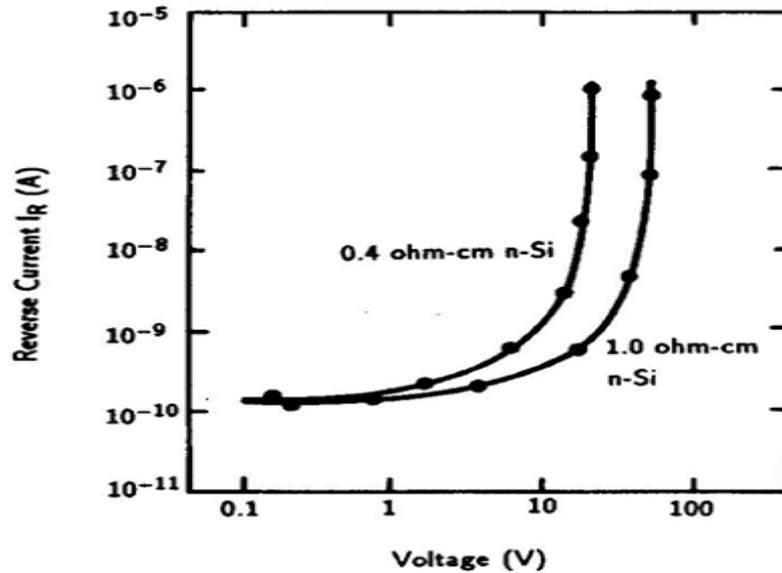


Figure II.8 : Les caractéristiques I-V inverses pour d'une diode Schottky Al/n-Si avec deux résistivités différentes de substrat [23].

### II.3.2.2. La diode Schottky GaAs

Pour les diodes Schottky au GaAs, le contact métallique est souvent de l'or (Au). La figure II.9 présente les caractéristiques avant I-V presque idéales pour trois Au / GaAs de type n diodes à barrière de Schottky formée sur le substrat de GaAs avec différentes orientations cristallines.

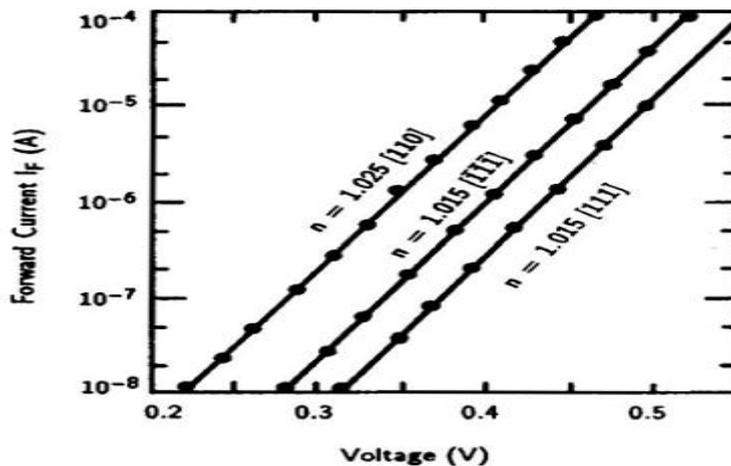


Figure II.9 : Les caractéristiques I-V directes pour d'une diode Schottky Au/n-GaAs diodes fabriqué sur un substrat de différentes orientations [23].

### II.3.3. Applications de diodes Schottky

Les diodes Schottky sont largement utilisés pour une grande variété d'applications telles que les cellules solaires, les photodétecteurs, les transistors à effet de champ à barrière Schottky (MESFET), des transistors à effet de champ de modulation-dopées (MODFETS ou HEMT) (modulation-doped field-effect transistors), mélangeurs micro-ondes, d'atténuateurs RF, redresseurs, varactors, des diodes Zener. Comme exemple, la relation logarithmique exacte affichée par la courbe I-V de la diode Schottky dans des conditions de polarisation directe sur plusieurs décades de voltage permet de les utiliser dans des circuits de conversion logarithmique. Un contact métal-semi-conducteur (diode Schottky) peut également être utilisé comme un condensateur variable dans les circuits paramétriques pour multiplication de fréquence. La cellule solaire à barrière de Schottky a le potentiel pour une utilisation en tant que un dispositif de conversion photovoltaïque

à faible coût de l'énergie terrestre à grande échelle. Photodiodes à barrière de Schottky à grande vitesse couvrant une large longueur d'onde allant de l'ultraviolet au visible et dans le régime spectral infrarouge moyen ont été rapportées en utilisant différents contacts métal-semi-conducteur [22].

# Chapitre III

## Étude expérimentale

### III.1.Introduction

Dans ce chapitre on va présenter les mesures réalisées sur des diodes Schottky en puits quantiques multiples (Multi Quantum Wells, MQWs) à base de GaAs/AlGaAs et de photodiodes PIN en Si. Les appareils de mesures utilisés dans ce travail sont d'abord brièvement décrits. Il s'agit de la source mètre, source de la lumière et la capacitance mètre. Ce dernier est contrôlé par le logiciel LabView qui va être aussi présenté. Les mesures réalisées sont les caractéristiques courant-tension et capacité-tension sous l'effet de la lumière.

### III .2. Les échantillons

#### III.2.1 Les diodes Schottky en MQW GaAs/AlGaAs)

Les échantillons GaAs/AlGaAs MQW, à savoir: NU780, NU781, NU785 ont été caractérisés. Ces échantillons, constituée de multicouches GaAs et AlGaAs, ont été déposés par la technique de croissance épitaxiale (Jet moléculaire ; en Anglais Molecular Beam epitaxy, MBE) sur des substrats de GaAs à différentes températures. Les paramètres de croissance des échantillons étaient: 1 couche/s et 45 monocouche /s pour GaAs et  $Al_{0,33}Ga_{0,67}As$ , respectivement. Les températures de croissance de 600 ° C, 650 ° C et 675 ° C ont été utilisés. En raison des différentes températures de croissance, les échantillons ont été réalisés à différentes pressions des molécules de  $As_2$  et  $As_4$  de  $1,2 \times 10^{-5}$  et  $2 \times 10^{-5}$  Tor, respectivement. La structure des couches de l'échantillon commence à partir de substrat en GaAs- $n^+$  ( $n \sim 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , une couche tampon de GaAs de 1  $\mu\text{m}$  d'épaisseur puis une couche  $Al_{0,33}Ga_{0,67}As$  de 0,14  $\mu\text{m}$  d'épaisseur ( $n = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ), 60 boucles de chaque 50.9Å puits quantique de GaAs et 84.8Å  $Al_{0,33}Ga_{0,67}As$ , respectivement [11]. Le type n est obtenu par dopage par le Si. Le Tableau III.1 résume les conditions de croissance des diodes Schottky MQW GaAs/AlGaAs).

Echantillon	Arsenic	température de croissance (° C)	Dopage ( $\text{cm}^{-3}$ )	Epaisseur des puits GaAs/ $Al_{0,33}Ga_{0,67}As$ (Å)
NU 780	$AS_2$	600	$2 \cdot 10^{16}$	50,9/84,8
NU 781	$AS_4$	600	$2 \cdot 10^{16}$	50,9/84,8
NU 785	$AS_4$	675	$2 \cdot 10^{16}$	50,9/84,8

Tableau III.1 : Quelques propriétés des diodes Schottky MQW GaAs/ $Al_{0,33}Ga_{0,67}As$  [11].

### III.2.2 La photodiode PIN en Si

La photodiode utilisée dans ce travail est la BPX65. Elle a une structure PIN en silicium cristallin. Ces caractéristiques sont détaillées dans l'Annexe B.

### III.3. Les montages expérimentaux

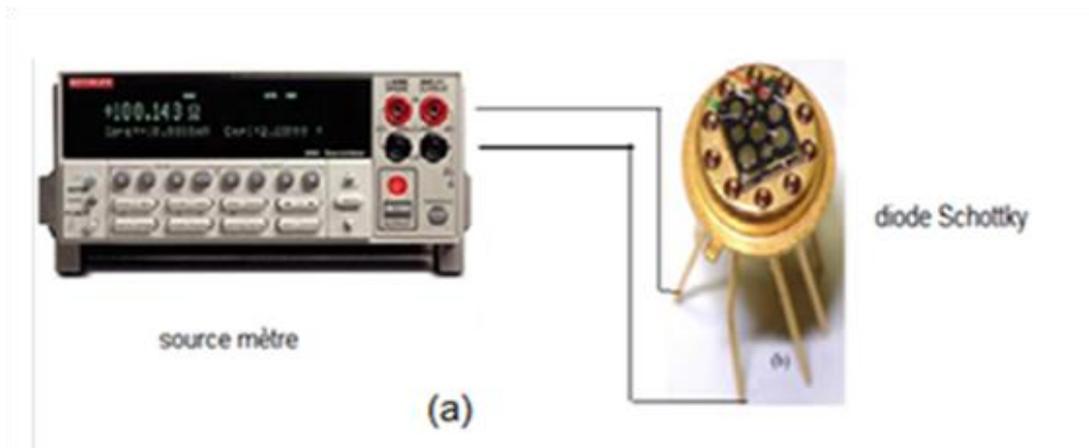
Dans cette section on présente les appareils utilisés pour mesurer les caractéristiques courant-tension et les caractéristique capacité-tension sous l'effet de la lumière.

#### III. 3.1. Caractéristiques courant-tension

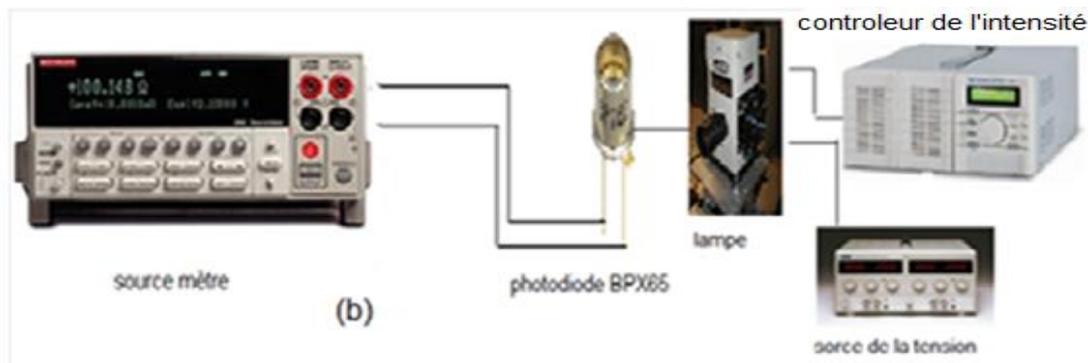
Les appareils utilisés dans ce travail, pour mesurer les caractéristique courant-tension, sont : un source mètre, un source de tension, contrôleur de l'intensité lumineuse et une lampe. Ces appareils sont utilisés en mode manuel.

Pour les diodes Schottky, on a utilisé le source mètre pour appliquer la tension et mesurer Le courant en obscurité et sous l'effet de lumière ambiante. Ce montage est illustré dans la figure III.1.

Pour la photodiode On a utilisé des appareils indépendants pour l'application de la tension et la mesure du courant. Pour la tension on utilisé un source de tension et le courant est mesuré par le source mètre. L'intensité de la lumière est contrôlée par un variateur d'intensité d'une lampe. Ce montage est illustré dans la figure III.2



**Figure III.1 : Montage expérimental pour mesurer les caractéristique courant-tension des diodes Schottky.**



**Figure III.2 : Montage expérimental pour mesurer les caractéristique courant-tension des photodiodes PIN.**

### **III.3.1. 1. Source mètre**

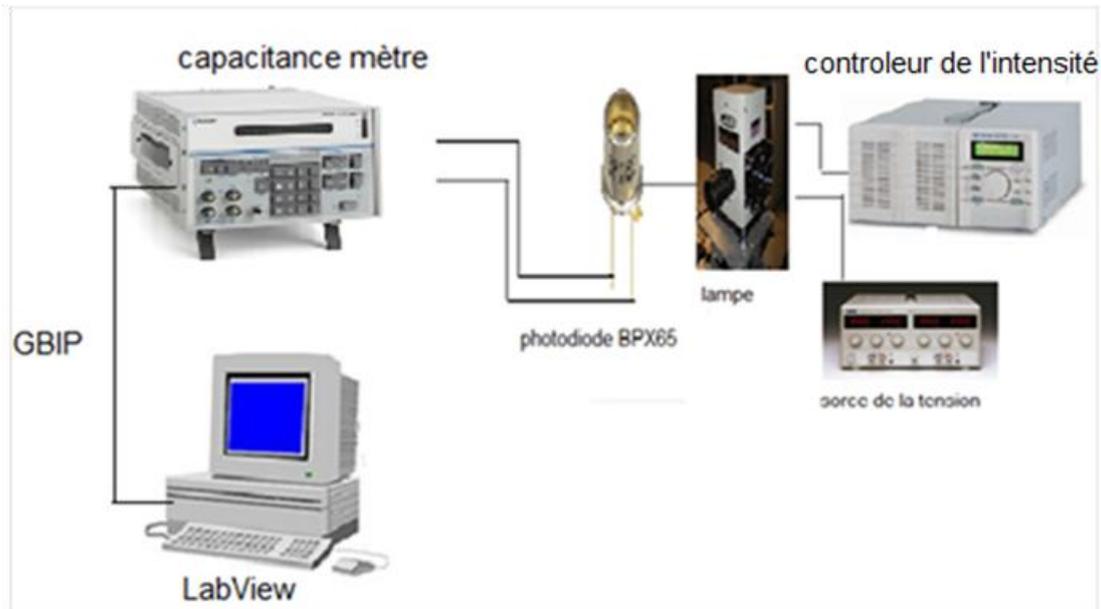
Le source mètre utilisé est de type Keithley 2400. Cet appareil peut être utilisé en mode manuel ou automatisé par un logiciel. Dans ce travail on a utilisé le premier mode à cause des difficultés d'installation de son driver (question de temps). La plage du courant mesurable 0A-1.05A. La tension appliquée est dans la plage 0 V-250 V.

### **III.3.1.2. Contrôleur de l'intensité**

Le contrôleur de l'intensité lumineuse utilisé est de type psh3620A de GW-Instek. Cet appareil peut délivrer une puissance allant de 1 W à 25W. La lampe est de 250 W installé dans un dispositif d'Oriel Instruments.

### **III.3.2. Caractéristiques capacité-tension**

Les caractéristiques capacité-tension sont mesurés pour la photodiode PIN sous l'effet de la lumière. La mesure de ces caractéristiques est automatisée selon le montage montré dans la figure III.3. La capacitance mètre de type Boonton 7200 est utilisé pour relever la capacité en fonction de la tension. Cet appareil est contrôlé par le logiciel LABVIEW. Une source de tension, un contrôleur d'intensité et une lampe sont utilisées pour contrôler l'intensité de la lumière.



**Figure III.3 : Montage expérimental pour mesurer les caractéristiques capacité-tension de la photodiode PIN sous l'effet de la lumière.**

### III.3.2.1. Le capacitance mètre

Le capacitance mètre Boonton, modèle 7200, est employé pour mesurer les caractéristiques capacité-tension en mode sinusoïdale. La fréquence de mesure est 1 MHz. La tension appliquée peut atteindre  $\pm 100$  V. La capacité mesurable peut aller de -2000PF à +2000 PF.

### III.3.2.2. Source de la tension

La source de tension est utilisée pour protéger la lampe du surchauffement. La source est de type TTI EL302D qui peut délivrer une tension maximale de 30 V.

### III.3.2.3. LabView

Le LabView est un logiciel de National Instruments (NI) utilisé pour le contrôle d'une large gamme d'appareils de mesure à travers le bus de commande GPIB488. Il suffit d'installer le driver de l'instrument dans ce logiciel. En ce qui nous concerne, nous avons utilisé le LabView afin de commander la capacitance mètre Boonton 7200. Un exemple de la fenêtre de commande est présenté dans la figure III.4. On définit la plage des tensions ainsi que le pas de variation dans cette fenêtre. Plus de détails sur logiciel LabView sont présentés dans l'Annexe A.

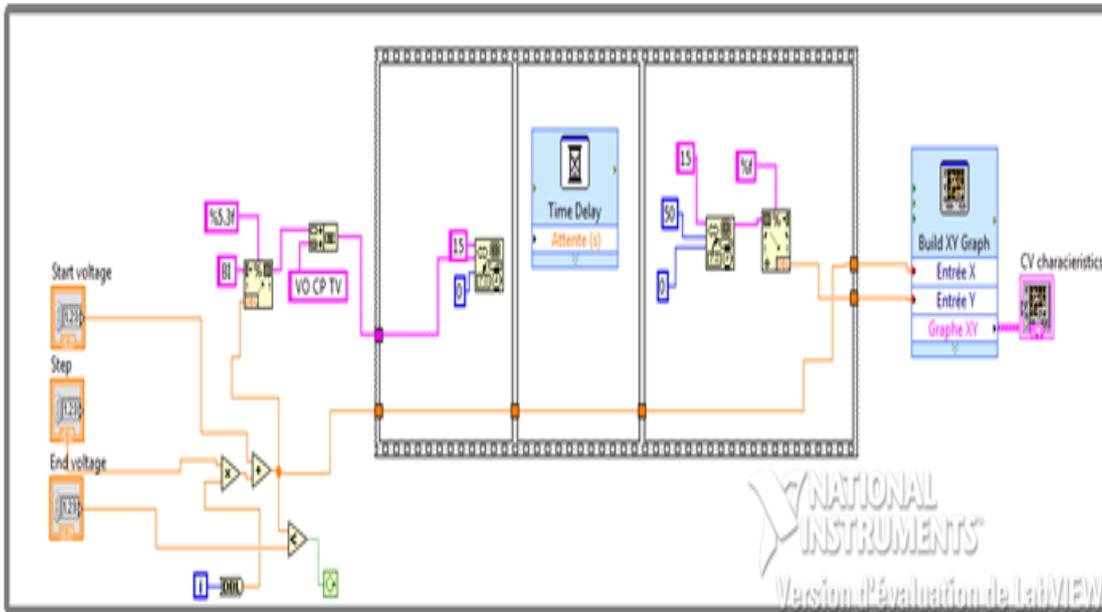


Figure III. 4 : Le schéma de commande du capacitance mètre Boonton 7200 par LabView.

Un exemple de la caractéristique C-V est représenté dans la figure III.5.

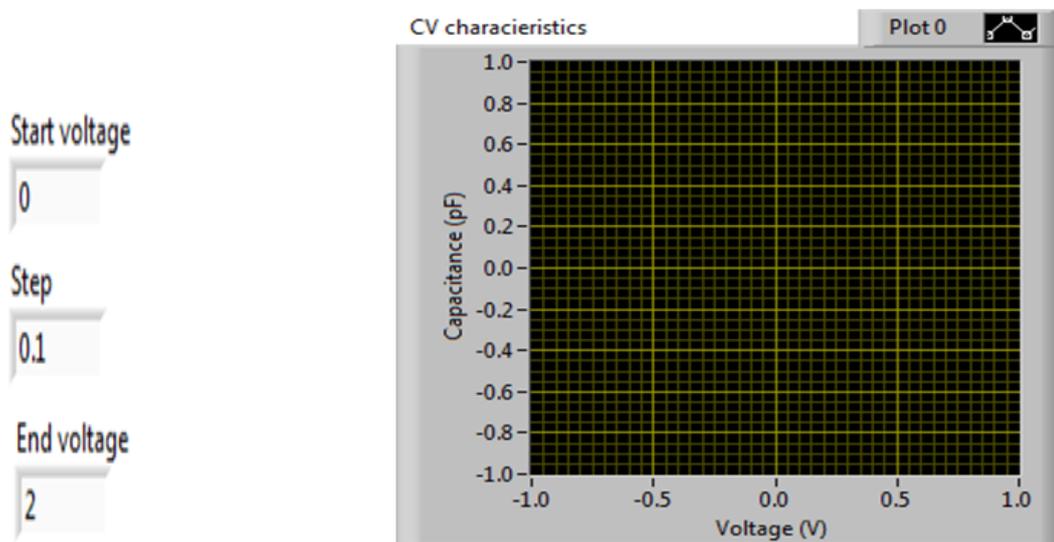


Figure III. 5 : Un exemple de la fenêtre de commande du capacitance mètre Boonton 7200 par LabView.

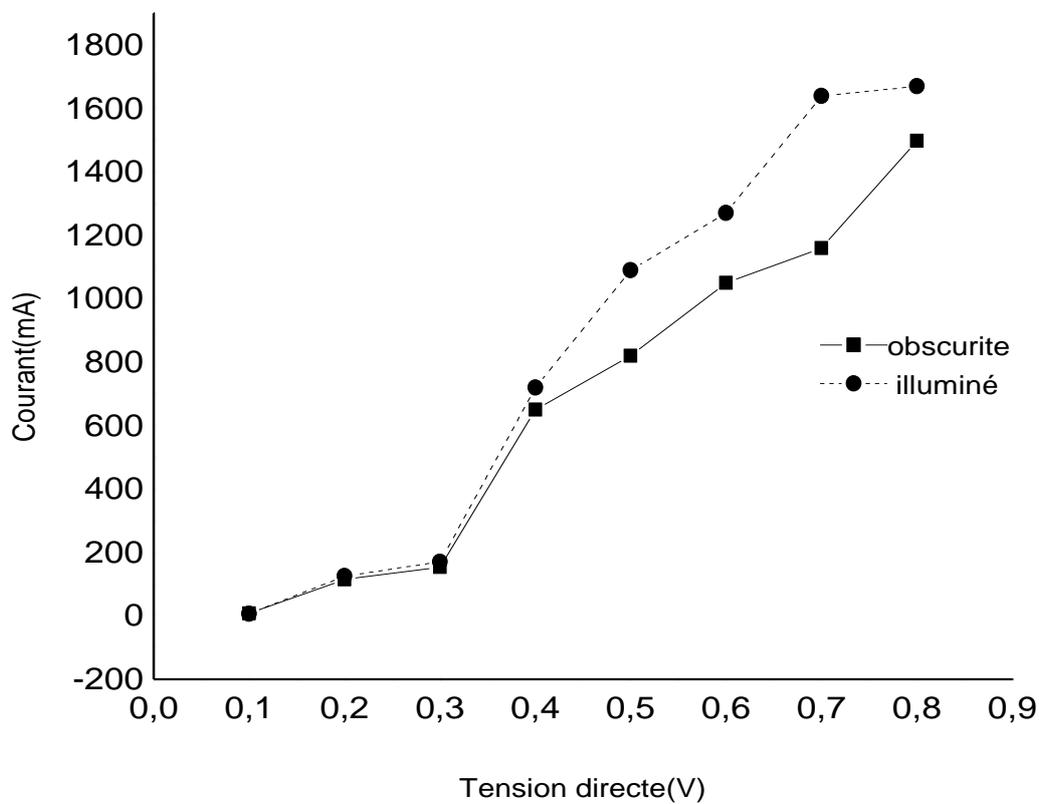
### III. 4. Mesure des caractérisations électriques

Dans ce travail on a réalisé plusieurs mesures. Les caractéristiques courant-tension de trois échantillons (diodes Schottky en MQW GaAs/AlGaAs) et une photodiode sous l'effet de la lumière sont mesurées. Pour la photodiode on a aussi relevé les caractéristiques capacité-tension sous l'effet de la lumière.

### III. 4.1. Les Caractéristique courant–tension pour les diodes Schottky

La caractérisation courant-tension est réalisée manuellement à l'aide du montage décrit dans la section III. 3.1, la figure (III.1).

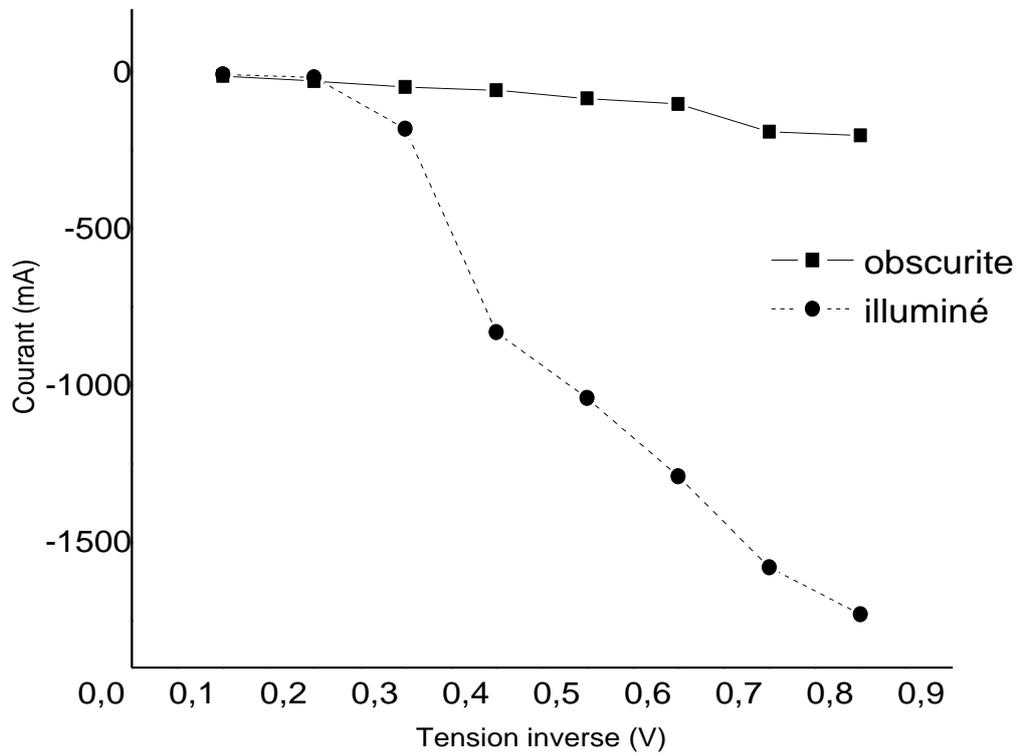
Les caractéristiques directes I-V de l'échantillon NU780 en obscurité et sous l'effet de la lumière ambiante son montrées dans la figure III.6.



**Figure III .6 :**  
**La caractéristique courant–tension directe de la diode Schottky NU780 en obscurité et sous la lumière ambiante.**

La figure montre l'augmentation de courant avec l'augmentation d'effet de la lumière ou obscurité. Ceci est acceptable puisque la lumière génère des paires électron-trou pour contribuer au courant.

Les caractéristiques indirectes I-V de l'échantillon NU780 en obscurité et sous l'effet de la lumière ambiante sont montrées dans la figure III.7.

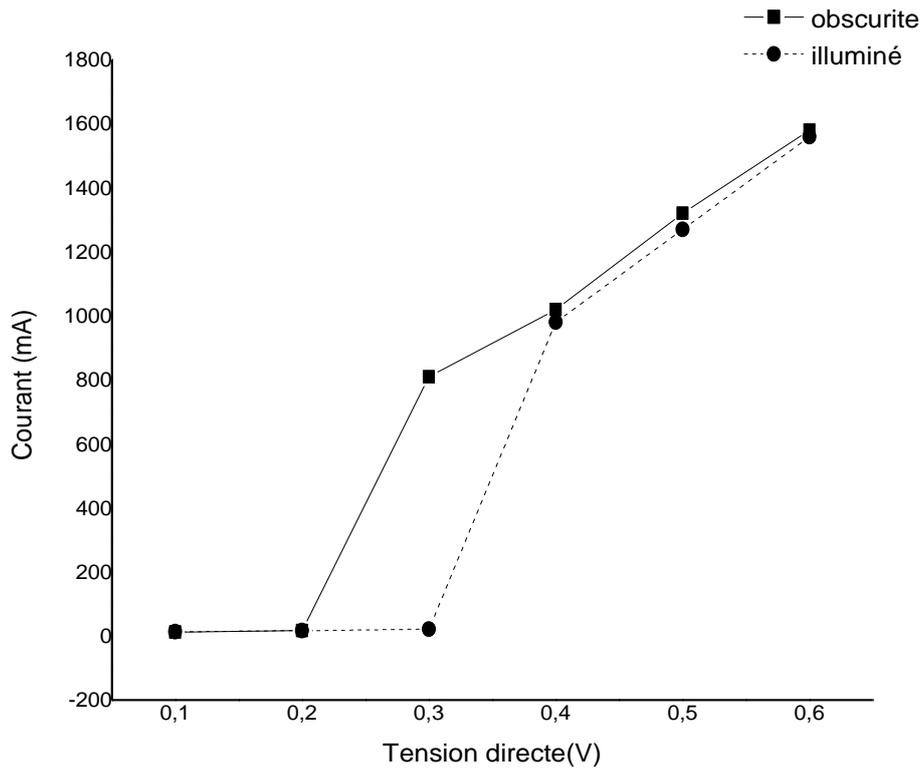


**Figure**

**III.7 : La caractéristique courant-tension inverse de la diode Schottky NU780 en obscurité et sous la lumière ambiante.**

La figure montre l'augmentation de courant avec l'augmentation d'effet de la lumière ou obscurité. Ceci est acceptable puisque la lumière génère des paires électron-trou pour contribuer au courant.

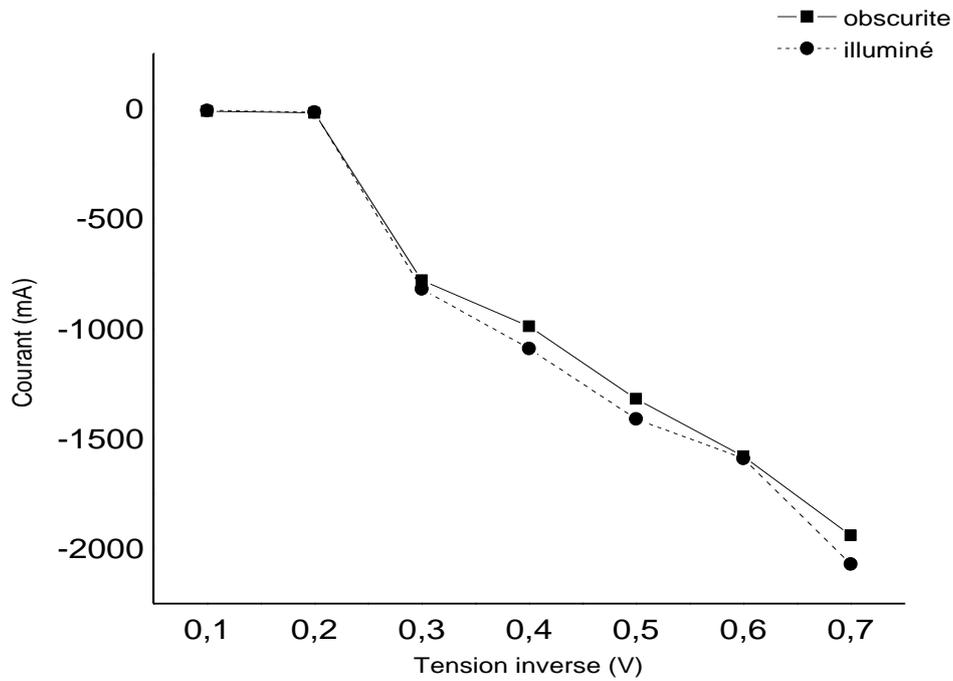
Les caractéristiques directes I-V de l'échantillon NU781 en obscurité et sous l'effet de la lumière ambiante sont montrées dans la figure III.8.



**Figure III.8 : La caractéristique courant–tension directe de la diode Schottky NU781 en obscurité et sous la lumière ambiante.**

La figure montre l'augmentation de courant avec l'augmentation d'effet de la lumière ou obscurité. Ceci est acceptable puisque la lumière génère des paires électron-trou pour contribuer au courant.

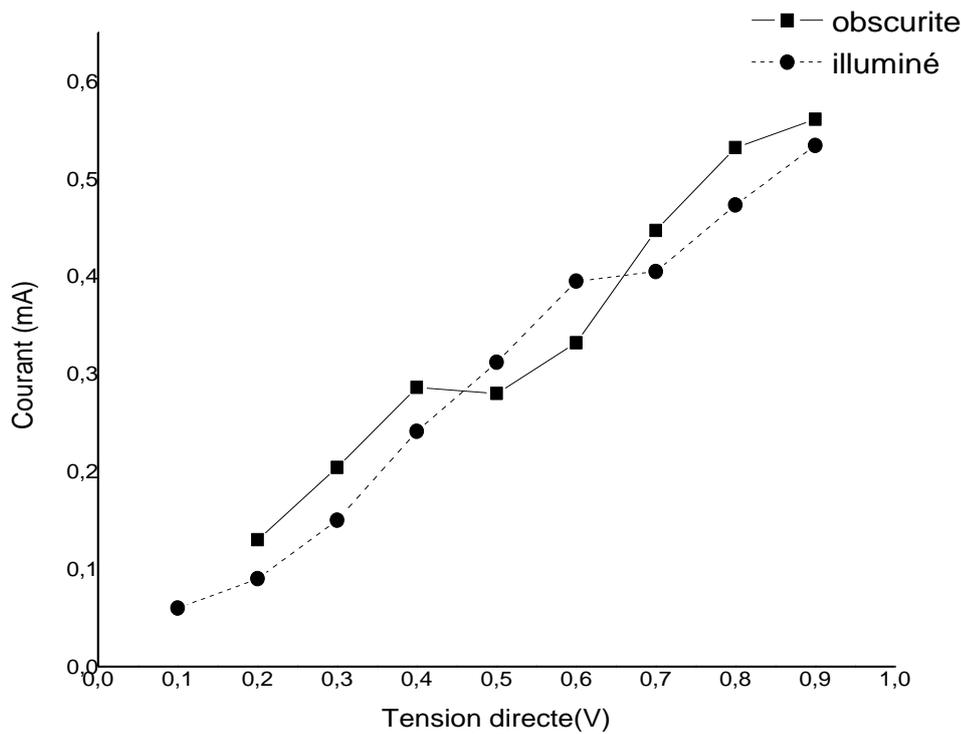
Les caractéristiques indirectes I-V de l'échantillon NU781 en obscurité et sous l'effet de la lumière ambiante sont montrées dans la figure III.9.



**Figure III.9 : La caractéristique courant-tension inverse de la diode Schottky NU781 en obscurité et sous la lumière ambiante.**

La figure montre l'augmentation de courant avec l'augmentation d'effet de la lumière ou obscurité. Ceci est acceptable puisque la lumière génère des paires électron-trou pour contribuer au courant.

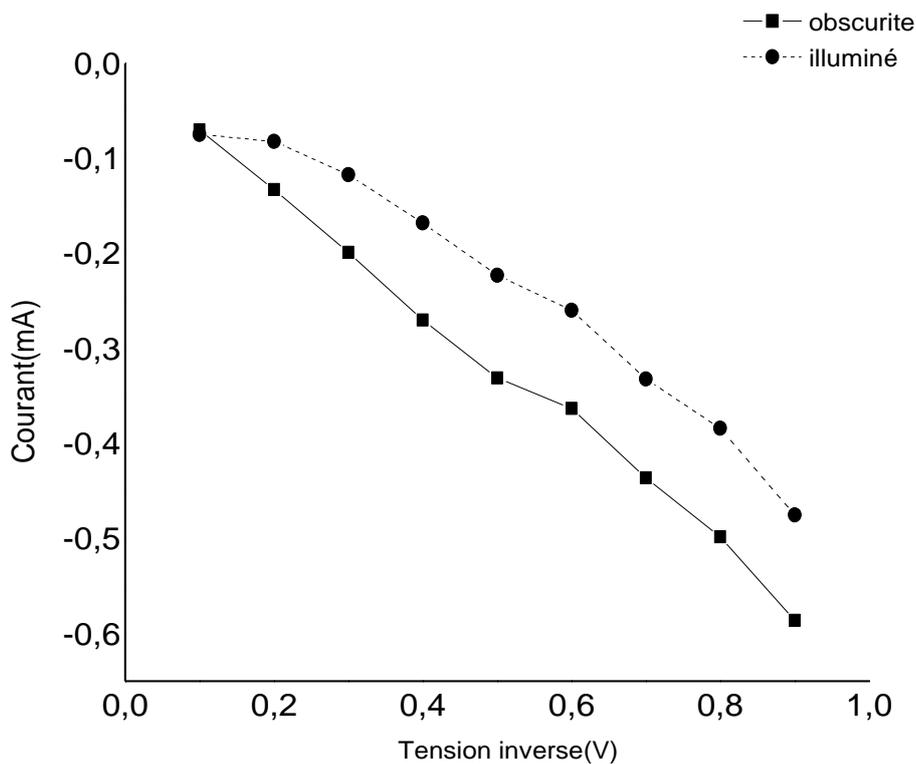
Les caractéristiques directes I-V de l'échantillon NU785 en obscurité et sous l'effet de la lumière ambiante sont montrées dans la figure III.10.



**Figure III. 10 : La caractéristique courant–tension directe de la diode Schottky NU785 en obscurité et sous la lumière ambiante.**

La figure montre l'augmentation de courant avec l'augmentation d'effet de la lumière ou obscurité. Ceci est acceptable puisque la lumière génère des paires électron-trou pour contribuer au courant. Et montre aussi une diminution de courant indiquant la présence des défauts.

Les caractéristiques indirectes I-V de l'échantillon NU785 en obscurité et sous l'effet de la lumière ambiante sont montrées dans la figure III.11.



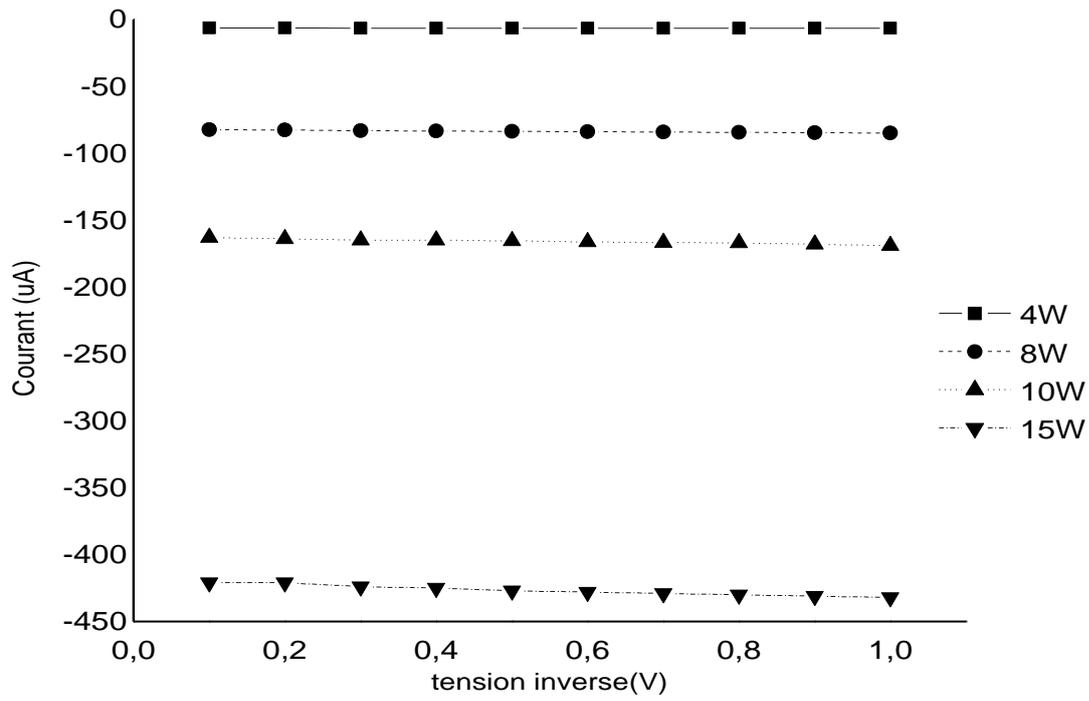
**Figure III. 11 : La caractéristique courant–tension inverse de la diode Schottky NU785 en obscurité et sous la lumière ambiante.**

La figure montre l'augmentation de courant avec l'augmentation d'effet de la lumière ou obscurité. Ceci est acceptable puisque la lumière génère des paires électron-trou pour contribuer au courant.

#### **III. 4.2. Les Caractéristiques courant –tension pour la photodiode (BPX65)**

La caractérisation courant-tension est réalisée manuellement à l'aide du montage décrit dans la section III.3.1, la figure (III.2). Puisque la photodiode fonctionne en polarisation inverse seules les caractéristiques inverses sont mesurées.

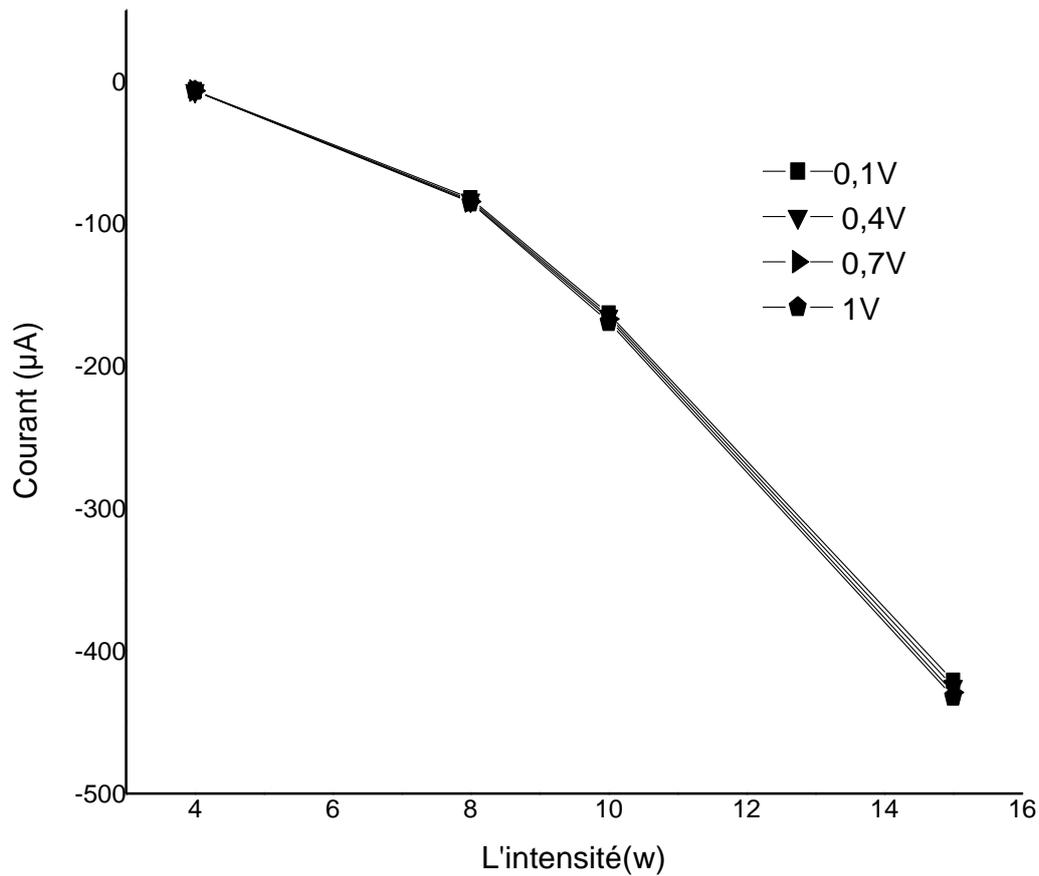
Les caractéristiques I-V indirectes de la photodiode sous l'effet de différentes intensités lumineuses sont montrées dans la figure III.12.



**Figure**

**III.12 : La caractéristique courant-tension indirecte de la photodiode PIN pour différentes intensités lumineuses.**

Dans cette figure le courant est constant en fonction de la tension mais augmente avec l'augmentation de l'intensité lumineuse comme indiquées dans la figure III.12.



**Figure III.13 :**

**Le courant indirect de la photodiode PIN en fonction de l'intensité lumineuse pour différentes tension indirectes.**

La figure montre l'augmentation de courant avec l'augmentation de l'intensité lumineuse. Ceci est acceptable puisque la lumière génère des paires électron-trou pour contribuer au courant.

### **III. 4. 3. Les Caractéristiques capacités –tension dans la photodiode (BPX65)**

La caractérisation capacité-tension inverse est réalisée par logiciel LabView à l'aide du montage décrit dans la section III.3.2, la figure (III. 3).

Des exemples des résultats des caractéristiques capacité-tension obtenus du logiciel LabView sont montrés dans les figures III.13, III.14, III.15, III.16, pour les intensités 10, 12, 13,15.

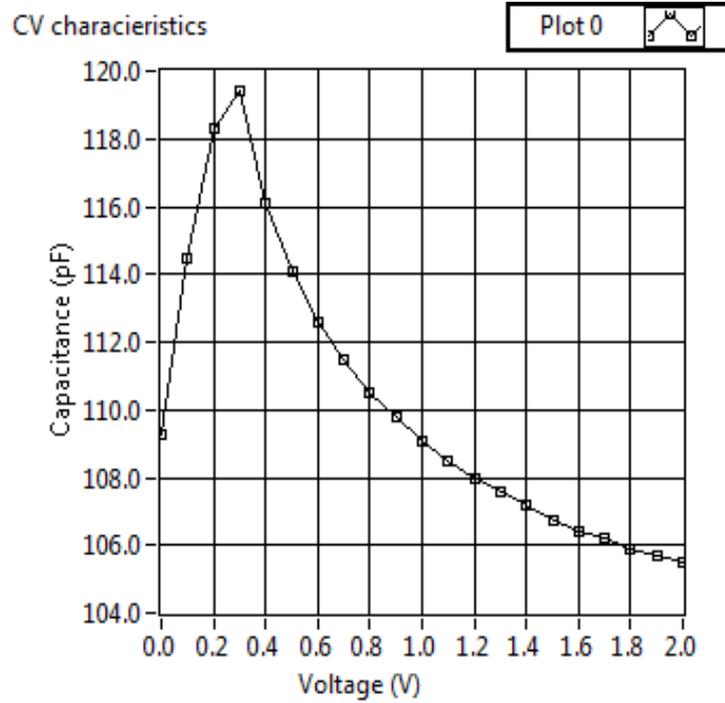


Figure III.14 : La caractéristique C-V inverse de la photodiode pour une intensité lumineuse de 10 W.

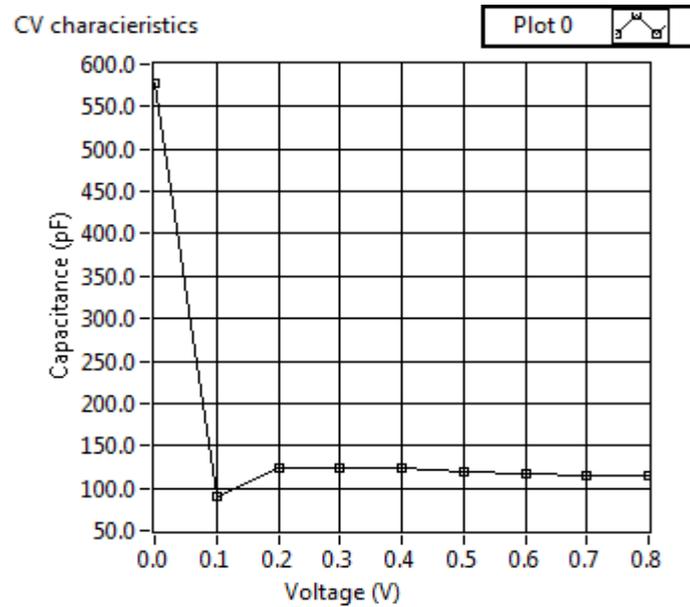
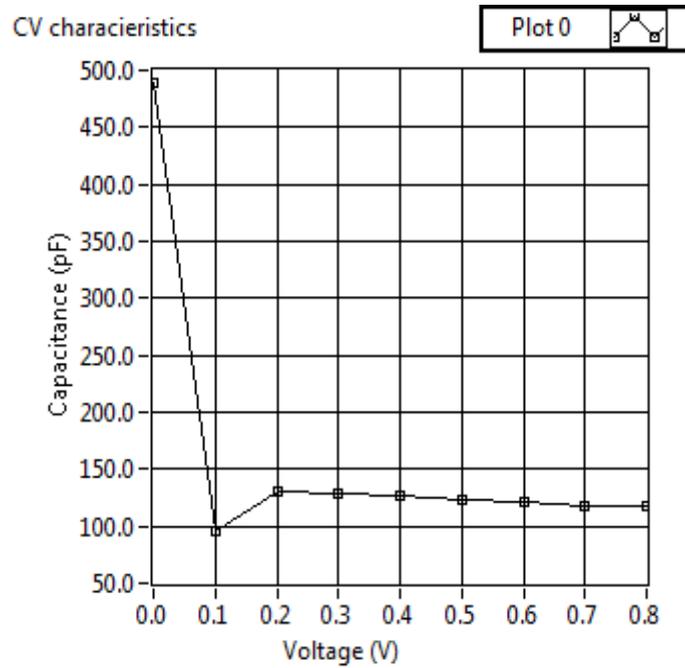
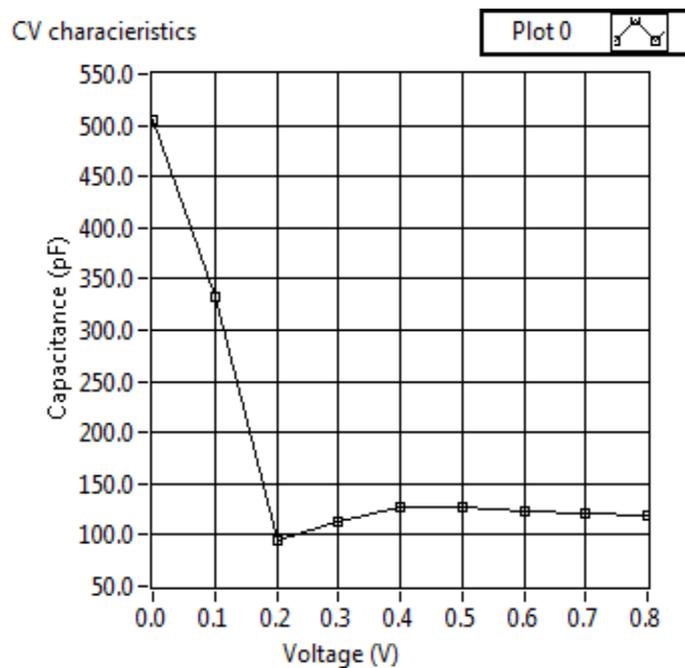


Figure III.15 : La caractéristique C-V inverse de la photodiode pour une intensité lumineuse de 12 W.



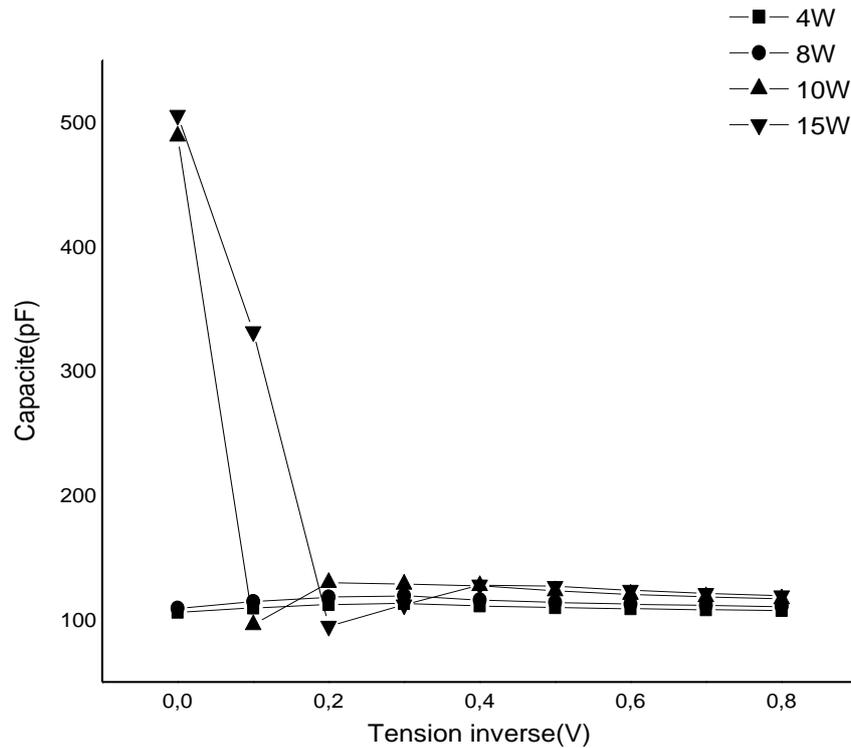
**Figure III.16 : La caractéristique C-V inverse de la photodiode pour une intensité lumineuse de 13 W.**



**Figure III.17 : La caractéristique C-V inverse de la photodiode pour une intensité lumineuse de 15 W.**

Les Figure montrent l'augmentation de capacité avec l'augmentation de l'intensité lumineuse.

Des exemples des résultats des caractéristiques capacité-tension inverse obtenus par l'origine sont montrés dans les figures III.18.



**Figure III.18 : La caractéristique C-V inverse de la photodiode sous l'effet de différentes intensités lumineuses.**

La capacité est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la zone de déplétion selon la relation :

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{W} \quad \text{III.1}$$

$W$  : L'épaisseur de la zone charge espace

D'autre part l'épaisseur est donnée par :  $\epsilon$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0 \epsilon}{qN}} (V_B - V) \quad \text{III.2}$$

$\epsilon_r$  : constante diélectrique.

$q$  : charge de l'électron.

$V_B$  : barrière de potentiel.

$V$  : le potentiel appliqué.

On remarque que l'épaisseur de la zone charge espace est inversement proportionnelle au dopage  $N$ .

Lorsqu'on expose la photodiode à la lumière des paires électron-trou sont générés. Dans la zone de déplétion le dopage effectif est peut être augmenté. Donc l'épaisseur est diminuée donc la capacité augmente.

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de la lumière sur les caractéristiques courant-tension et capacité-tension des diodes Schottky et une photodiode. Les diodes Schottky sont fabriquées à l'Université de Nottingham (Angleterre). Des couches épitaxiales de l'Arsenic de Gallium (GaAs) et l'Arsenic de gallium/Aluminium (AlGaAs) sont inter-déposées sur un substrat en GaAs de type  $N^+$  à différentes températures et différentes pression d' $As_2$  et  $As_4$  par le technique épitaxiale dite Epitaxie par Jets Moléculaire (5EJM ou MBE : Molecular Beam Epitaxy en Anglais). L'inter-déposition des couches GaAs et AlGaAs produit des puits quantiques pour améliorer les caractéristiques de ces diodes qui sont destinées à des applications optiques. La photodiode est une diode commerciale (BPX65) de Siemens ayant une structure PIN en Silicium cristallin.

On a utilisé plusieurs appareils de mesure pour réaliser les mesures de l'effet de la lumière sur les caractéristiques I-V et C-V. L'intensité de la lumière est contrôlée par un variateur de puissance d'une lampe. Pour les caractéristiques I-V des diodes Schottky et la photodiode, les mesures sont relaissées manuellement en utilisant une source mètre de type Keithly 2400. Les caractéristiques C-V de la photodiode sont automatisés par le logiciel LabView de National Instruments qui commande le capacitance mètre de type Boonton 7200.

Les caractéristiques I-V des diodes Shottky montrent que ces diodes ne sont pas idéales. En polarisation directe le courant augmente avec l'augmentation de la tension mais pas d'une façon purement exponentielle. Elle entre une fonction exponentielle et linéaire. Le courant inverse lui aussi n'est pas idéal puisque il augmente (en valeur) avec l'augmentation de la tension inverse. Cette non idéalité est liée à la présence de défauts dans ces diodes. Ces défauts sont caractérisés à l'Université de Nottingham [11]. La présence des défauts dans le GaAs est très connue. Ces diodes ne sont seulement de GaAs mais d'hétérojonctions GaAs/AlGaAs qui est plus défectueux que le GaAs.

Pour la photodiode seules les caractéristiques I-V inverses sont mesurées puisque ce dispositif est généralement utilisé en polarisation inverse. Le courant est constant en polarisation inverse indiquant une caractéristique idéale. Ceci est normale puisque les photodiodes sont en Silicium qui est un matériau presque parfait.

Dans tous les dispositifs étudiés le courant augmente avec l'augmentation de l'intensité de la lumière. Ceci est évident puisque la lumière génère des paires électron-trou pour contribuer au courant.

Les caractéristiques capacité-tension de la photodiode montrent un comportement habituel. La capacité diminue avec l'augmentation de la tension inverse. La capacité généralement augmente avec l'augmentation de la l'intensité de la lumière. La capacité est inversement proportionnelle à l'épaisseur de la zone de déplétion. L'épaisseur de la zone charge espace est inversement proportionnelle au dopage.

Lorsqu'on expose la photodiode à la lumière des paires électron-trou sont générés. Dans la zone de déplétion le dopage effectif est peut être augmenté. Donc l'épaisseur est diminuée donc la capacité augmente.

## Références bibliographiques

- [1] S. S. Li, Semiconductor Physical Electronics, 2<sup>nd</sup> edition, Springer, New York, 2006.
- [2] C. Kittel, Introduction to Solid State Physics, 8th Ed, John Wiley and Sons, New Jersey, 2005.
- [3] Francis Lévy, Physique et technologie des semi conducteurs», Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), Paris, 1994.
- [4] F.P. Mc. Cluskey , High Temperature Electronics, CRC Press, New York, 1997.
- [5] S. M. SZE, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, New Jersey, 1981.
- [6] H. Mathieu, Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Masson, Paris, 1996.
- [7] A. L. McKelvey, Retrograde solubility in semiconductors, Metallurgical and Materials Transactions A, 27A p. 2704. 1996.
- [8] P. Y. Yu and M. Cardona, Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties, Third edition, Springer, New York, 2005.
- [9] C.Hamaguchi , Basic Semiconductor Physics, Second edition Springer, New York, 2010.
- [10] [http: / Cst-www.nrl.navy.mil / lattice](http://Cst-www.nrl.navy.mil/lattice) (struck.X mol )
- [11] R. Hussain, Electrical characterization of defects in III-V compound semiconductors by DLTS, University of Nottingham, 2011.
- [12] J.P. Maury, Une histoire de la physique sans les équations, in Vuibert, Paris, Oct. 2000.
- [13] G. Harzallah, M. Remram ,Effets des paramètres de dépôt par la technique (magnetron Sputtring RF) sur la qualité cristalline des couches ZnO , Matériaux 2006 Dijon, 13-17 Novembre, France, 2006.
- [14] H. Mathieu, Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, Dunod, Paris 2001.
- [15] W. Gartner, Depletion layer photoeffects in semiconductors, in physical review, vol.116, p84-87,1959.

- [16] G. Baozeng, U. Ravaioli, M. Staedele, Full band monte carlo calculations of velocity-field characteristics of wurtzite ZnO, *Computer physics communications* 482–486, 2006.
- [17] S. Selberherr, *Analysis and simulation of semiconductor devices*, Wien, Austria: Springer-verlag, 1984.
- [18] A. F. Salem, A. W. Smith, and K. F. Brennan, Theoretical study of the effect of an AlGaAs double hétérostructure on metal-semiconductor-metal photodetecto performance, *Electron devices*, vol. 41, n°. 7, pp. 1112–1119, Jul. 1994.
- [19] A. Kuhaimi, S.A. Jn, Electron Affinity Difference in CdS/Si Solar Cells, *Appl. Phys* 37, 1998.
- [20] L. Riguttian, H. Julien, Photodétec te ur U V aveugle à la lumièr e du jour à base de nanofils d e GaN , Nationa l SunYat - Sen University , T ai w an .
- [21] J.C. Campbell, High-Gain Bandwidth Product Si/InGaAs avalanche photodetectors , in conference on optical fiber communication technical digest, ofc 97, pp35-36, 16- 21 Feb 1997.
- [22] S. Li. Sheng , *Semiconductor Physical Electronics*, University of Florida Gainesville, FL 32611–6130.

AnnexA

Logiciel

LabView

## I. LABVIEW

Labview (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) logiciel de programmation graphique qui utilise des icônes et non des lignes de texte pour créer des applications. À l'inverse des langages de programmation textuels dans lesquels des instructions déterminent l'exécution du programme en plus c'est un logiciel de développement d'applications d'instrumentation.

L'idée de Labview est de remplacer les instruments de mesures et d'analyse d'un laboratoire par un ordinateur muni de cartes spécifiques et d'un logiciel approprié. Ces cartes permettent de convertir des signaux électriques provenant de capteurs en données numériques, contient une gamme d'outils pour l'acquisition, l'analyse, l'affichage et l'enregistrement des données, ainsi que des outils pour l'aider à mettre au point de programme.

## II. Le principe de LabVIEW

Labview permet de réaliser, des instruments virtuels. Par extension, on appellera VI (Virtual Instrument), toute application réalisée avec Labview composé de trois parties.

### ➤ face-avant

C'est l'interface (ou moyen de communication) avec l'utilisateur.

Cette face-avant, personnalisable à loisir, est composée d'objets graphiques comme des interrupteurs, des potentiomètres, des zones de graphismes, des menus déroulants etc. Elle représente la face-avant de l'instrument.

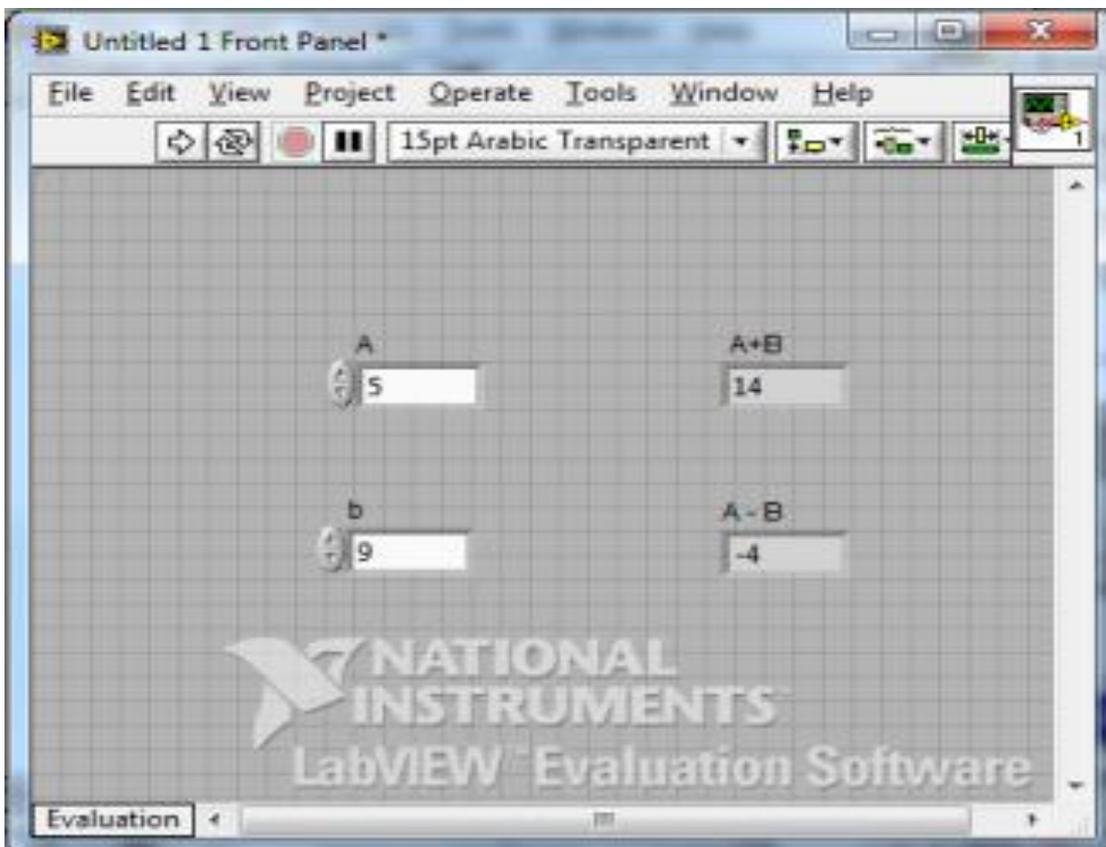
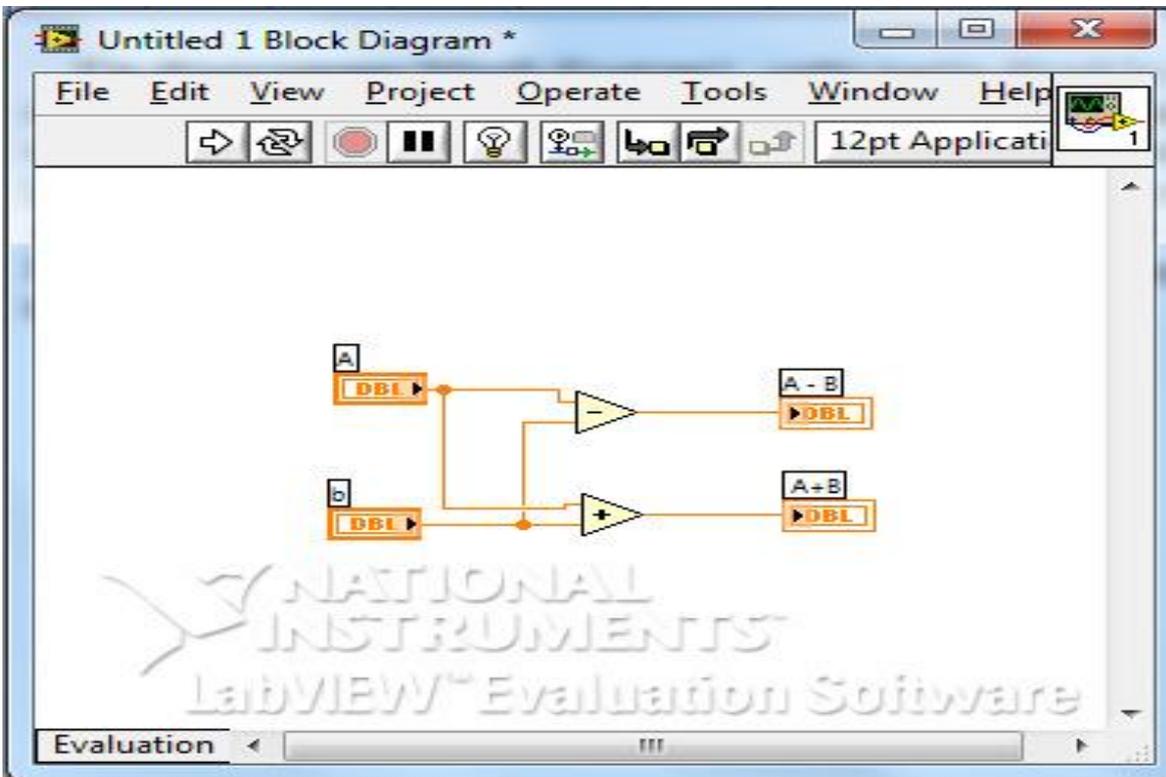


Figure 2: face-avant

### ➤ Un diagramme (block diagram)

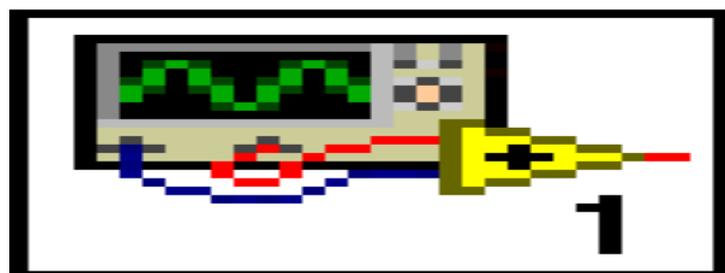
Cette partie décrit le fonctionnement interne du VI. On utilise le langage G pour décrire ce fonctionnement. Destiné à être utilisé par des ingénieurs et des scientifiques, non informaticiens de formation, Labview utilise un langage de programmation graphique G (pour Graphique) afin de décrire les programmes dictant le comportement de l'application. Ainsi l'utilisateur est affranchi de la lourde syntaxe des langages de programmation textuels tels que C, Basic, etc.



**Figure 2: un diagramme.**

➤ **Une icône (Icon)**

C'est la symbolisation de l'instrument virtuel qui permettra de faire appel à un instrument virtuel déjà créé à l'intérieur d'un autre instrument virtuel, c'est un principe de structure hiérarchique et de modularité.



Annexe B

La photodiode

BPX65



**Grenzwerte**  
**Maximum Ratings**

Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Betriebs- und Lagertemperatur Operating and storage temperature range	$T_{op}; T_{stg}$	-40 ... +80	°C
Löttemperatur (Lötstelle 2 mm vom Gehäuse entfernt bei Lötzeit $t \leq 3s$ ) Soldering temperature in 2 mm distance from case bottom ( $t \leq 3s$ )	$T_S$	230	°C
Sperrspannung Reverse voltage	$V_R$	50	V
Verlustleistung, $T_A = 25\text{ °C}$ Total power dissipation	$P_{tot}$	250	mW

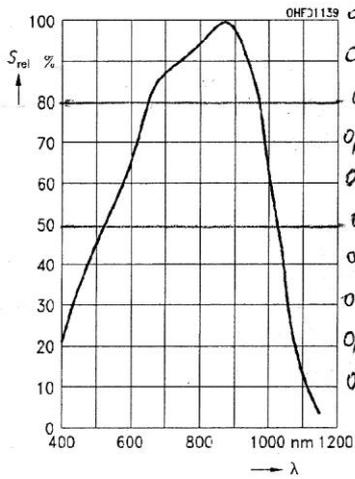
**Kennwerte** ( $T_A = 25\text{ °C}$ , Normlicht A,  $T = 2856\text{ K}$ )  
**Characteristics** ( $T_A = 25\text{ °C}$ , standard light A,  $T = 2856\text{ K}$ )

Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Fotoempfindlichkeit, $V_R = 5\text{ V}$ Spectral sensitivity	$S$	10 ( $\geq 5.5$ )	nA/lx
Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit Wavelength of max. sensitivity	$\lambda_{S\ max}$	850	nm
Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit $S = 10\%$ von $S_{max}$ Spectral range of sensitivity $S = 10\%$ of $S_{max}$	$\lambda$	350 ... 1100	nm
Bestrahlungsempfindliche Fläche Radiant sensitive area	$A$	1.00	mm <sup>2</sup>
Abmessung der bestrahlungsempfindlichen Fläche Dimensions of radiant sensitive area	$L \times B$ $L \times W$	1 x 1	mm
Abstand Chipoberfläche zu Gehäuseoberfläche Distance chip front to case surface	$H$	2.25 ... 2.55	mm
Halbwinkel Half angle	$\varphi$	$\pm 40$	Grad deg.

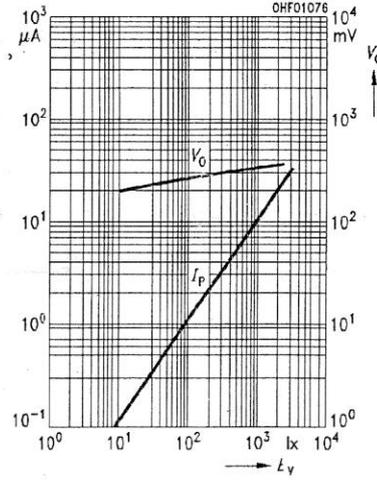
**Kennwerte** ( $T_A = 25\text{ °C}$ , Normlicht A,  $T = 2856\text{ K}$ )  
**Characteristics** ( $T_A = 25\text{ °C}$ , standard light A,  $T = 2856\text{ K}$ )

Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Dunkelstrom Dark current BPX 65: $V_R = 20\text{ V}$ BPX 66: $V_R = 1\text{ V}$	$I_R$	1 ( $\leq 5$ ) 0.15 ( $\leq 0.3$ )	nA
Spektrale Fotoempfindlichkeit, $\lambda = 850\text{ nm}$ Spectral sensitivity	$S_\lambda$	0.55	A/W
Quantenausbeute, $\lambda = 850\text{ nm}$ Quantum yield	$\eta$	0.80	<u>Electrons</u> Photon
Leerlaufspannung, $E_V = 1000\text{ lx}$ Open-circuit voltage	$V_L$	320 ( $\geq 270$ )	mV
Kurzschlußstrom, $E_V = 1000\text{ lx}$ Short-circuit current	$I_K$	10	$\mu\text{A}$
Anstiegs und Abfallzeit des Fotostromes Rise and fall time of the photocurrent $R_L = 50\ \Omega$ ; $V_R = 5\text{ V}$ ; $\lambda = 850\text{ nm}$ ; $I_p = 800\ \mu\text{A}$	$t_r, t_f$	12	ns
Durchlaßspannung, $I_F = 100\text{ mA}$ , $E = 0$ Forward voltage	$V_F$	1.3	V
Kapazität, $V_R = 0\text{ V}$ , $f = 1\text{ MHz}$ , $E = 0$ Capacitance	$C_0$	11	pF
Temperaturkoeffizient von $V_L$ Temperature coefficient of $V_L$	$TC_V$	-2.6	mV/K
Temperaturkoeffizient von $I_K$ Temperature coefficient of $I_K$	$TC_I$	0.2	%/K
Rauschäquivalente Strahlungsleistung Noise equivalent power $V_R = 20\text{ V}$ , $\lambda = 850\text{ nm}$	$NEP$	$3.3 \times 10^{-14}$	$\frac{\text{W}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
Nachweisgrenze, $V_R = 20\text{ V}$ , $\lambda = 850\text{ nm}$ Detection limit	$D^*$	$3.1 \times 10^{12}$	$\frac{\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}}}{\text{W}}$

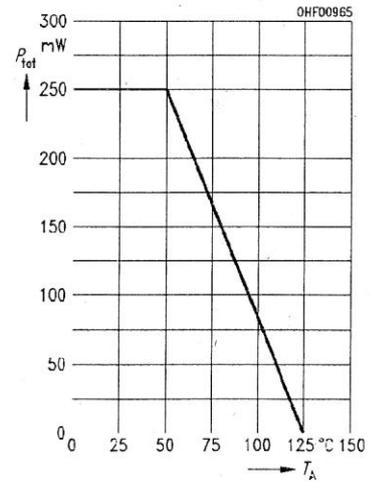
**Relative spectral sensitivity**  
 $S_{rel} = f(\lambda)$



**Photocurrent**  $I_P = f(E_V), V_R = 5 V$   
**Open-circuit-voltage**  $V_O = f(E_V)$

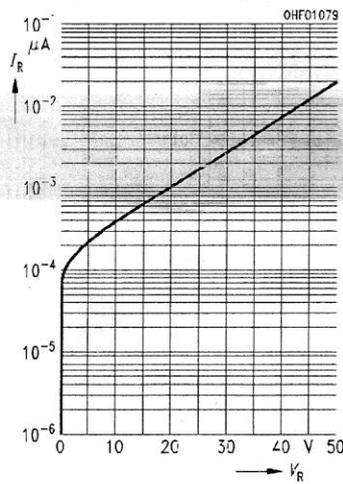


**Total power dissipation**  $P_{tot} = f(T_A)$



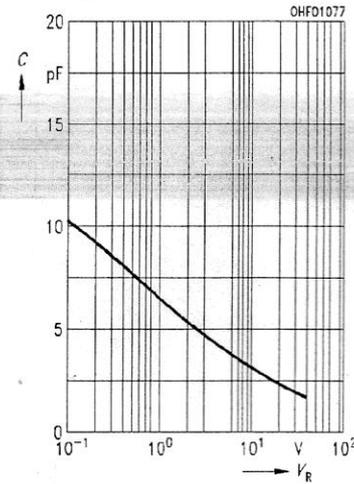
**Dark current**

$I_R = f(V_R), E = 0$



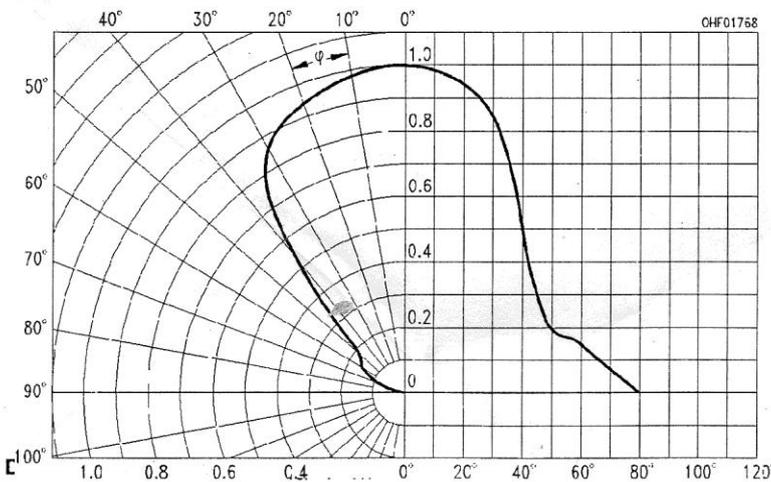
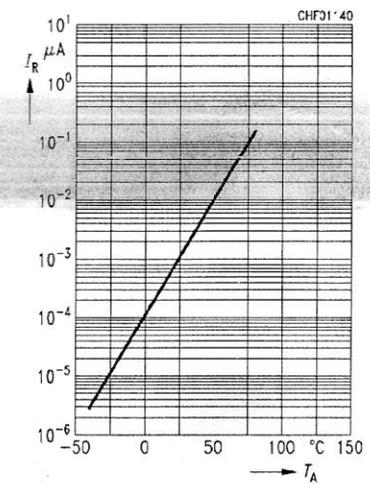
**Capacitance**

$C = f(V_R), f = 1 \text{ MHz}, E = 0$



**Dark current**

$I_R = f(T_A), V_R = 20 V, E = 0$



## Abstract

The effect of light on the current-voltage characteristics (I–V) for three Schottky diodes and a photodiode is measured. For the photodiode, the light effect on the capacitance-voltage characteristic (C–V) is also measured. The (I–V) characteristics are measured manually while the (C–V) characteristics are automated using LabView software. Schottky diodes are based on multiple quantum wells of GaAs / AlGaAs (MQW). The photodiode is a commercial PIN junction (BPX65 of Siemens) based on crystalline Si. It was found that the current (forward and reverse) value increases with the increase in the intensity of light for all samples. Reverse current of the Schottky diode increases with the increase of the reverse voltage indicating the presence of defects. The capacitance of the photodiode also increases with the increase of the intensity of light.

**Keywords:** Schottky diodes (GaAs/AlGaAs), photodiode PIN, the effect of light, characteristics (I-V), characteristics (C-V).

## المخلص:

تم قياس تأثير الضوء على الخصائص تيار-جهد (I–V) لاربع عينات ثلاثة من نوع الثنائيات شوتكي و الآخر الثنائي الضوئي. ويقاس أيضا تأثير الضوء على الخصائص سعة-جهد (C–V). تم قياس الخصائص (I–V) يدويا في حين تم قياس الخصائص (C–V) باستخدام برنامج LabView. الثنائيات شوتكي عبارة عن عدة آبار كمونية من ارسنيك الغاليوم و مزيج ارسنيك الغاليوم / ارسنيك الالمنيوم (MQW) (AlGaAs/GaAs). اما الثنائي الضوئي فهو PIN تجاري (BPX65 من Siemens) من السيلسيوم. وجد أن التيار (في الاستقطاب المباشر والعكسي) يزيد مع زيادة شدة الضوء بالنسبة لجميع العينات. التيار العكسي للصمام الثنائي شوتكي يزيد مع زيادة الجهد العكسي وهذا يشير إلى وجود عيوب. السعة في الثنائي الضوئي تزيد أيضا مع زيادة شدة الضوء.

**الكلمات المفتاحية:** الثنائيات شوتكي (GaAs / AlGaAs), الثنائي الضوئي PIN, تأثير الضوء, الخصائص تيار-جهد (I–V), الخاصية الخصائص سعة-جهد (C–V).