

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N° :.....



DOMAINE: SCIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION : MICRO-ELECTRONIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: KHEMISSI ASSAM
BOUKHADEM ABLA
Intitulé

ETUDE DES EFFETS EXTERIEUR SUR UNE PHOTODIODE

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. BOURAS Mounir Enseignant Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA ; Président.

Dr. TABBAKH Mostefa Université MOHAMED BOUDIAF - M'SILA ; Encadreur.

Dr. BENNACER Hamza Enseignant Université MOHAMED BOUDIAF- M'SILA ; Examineur.

Année universitaire : 2020 /2021

Remerciements

Je voudrais présenter mes remerciements à mon encadreur *Dr. TABAK HË MOSTAPHA* qui n'a pas hésité à fournir des orientations et des conseils qui a aidé à réaliser ce travail.

Je voudrais également lui témoigner mon gratitude pour sa patience et pour tous les efforts qui ont fait pour moi.

J'exprime mes sincères remerciements à *Dr. Bourace Mounir*, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire, je lui exprime. Mon respect.

J'adresse ma reconnaissance à *Dr. Ben Naceur Hamza*, qui m'a fait l'honneur d'examiner ce travail.

Je tiens remercier tous les enseignants de physique à l'université *Bakheti Elshadi*.

Je voudrais remercier aussi toutes les personnes qui ont participé

de près ou de loin à ce travail et à améliorer de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail à tout ce que peut-nous apporter le partage qu'il soit Culturel ou humain. Que le fait d'être lu puisse être et rester notre plus belle rétribution. J'ai l'honneur de dédier ce travail. A mes chers parents, et pour leur patience, leur soutien, Ma mère qui lors, de toutes mes années d'études, m'encouragé et soutenue, Et mon père qui m'a donné la force de continuer sans jamais baisser les bras. A mes frères et ma sœur et toute ma famille. À tous mes collègues. A tous mes proches amis. Mes remerciements les plus élogieux à MOUSTAPHA AMROUNE l'aide précieuse dans la réalisation de ce travail. En fin pour tous ceux qui, de près ou de loin ont rendu ce travail possible.

Khemissi Assam
Boukhademe Abba

RÉSUMÉ

Dans notre étude, nous intéressons aux photodiodes à base de silicium, principalement les photodiodes PIN. Ce travail est une simulation basée sur le logiciel SILVACO Atlas pour obtenir les caractéristiques électriques et optiques de la photodiode homo-jonction à savoir la caractéristique courant-tension (I-V) et la sensibilité spectrale ($S(\lambda)$). Nous avons simulé les effets de quelques paramètres sur les caractéristiques de la photodiode PIN. Nous avons pris en considération les paramètres les plus influents de point de vue performance d'une photodiode. En effet, nous avons simulé l'effet de l'épaisseur de la région intrinsèque, du dopage de la région intrinsèque et de la température. Nous avons également simulé l'effet de la surface de la photodiode et du rayonnement incident sur la photodiode.

Mots-clé : Photodiode PIN, Silicium, Simulation, SILVACO-Atlas, Courant tension, Sensibilité spectrale.

ABSTRACT

In our study, we are interested in silicon-based PIN photodiodes. This work is a simulation based on the SILVACO Atlas software to obtain the electrical and optical characteristics of the Si homojunction PIN photodiode, namely the current-voltage characteristic (I-V) and the spectral sensitivity ($S(\lambda)$). We have simulated the effects of some parameters on the characteristics of the PIN photodiode. We have considered the most influential parameters in terms of a photodiode performance. Indeed, we have simulated the effect of the intrinsic region thickness, the doping of the intrinsic region and the temperature. We also have simulated the effect of the photodiode surface and incident radiation on the photodiode.

Keywords: PIN photodiode, Silicon, Simulation, SILVACO-Atlas, Current-voltage, Spectral sensitivity.

ملخص

في دراستنا، نحن مهتمون بالثنائيات الضوئية من السيليكون وخصوصا الثنائيات الضوئية PIN هذا العمل عبارة عن محاكاة يعتمد على برنامج SILVACO Atlas للحصول على الخصائص الكهربائية و الضوئية للثنائي الضوئي أحادي الوصلة أي الخاصية الكهربائية تيار-جهد (I-V) (والاستجابة الطيفية $S(\lambda)$) لقد قمنا بمحاكاة تأثير بعض المتغيرات على خصائص الثنائية الضوئية PIN ولقد ركزنا على المعطيات الأكثر تأثيرا على الثنائي الضوئي وهي تأثير سمك المنطقة الجوهرية وتطعيم المنطقة الجوهرية ودرجة الحرارة و درسنا أيضا تأثير المساحة و الإشعاع الضوئي الوارد على الثنائي الضوئي.

الكلمات المفتاحية : ثنائي ضوئي PIN , سيليكون , محاكاة SILVACO-Atlas , تيار-جهد (I-V) , الاستجابة الطيفية ($S(\lambda)$)

| | |
|------------------------------|---|
| - Remercîment. | |
| - Dédicace. | |
| - Résumer. | |
| - Sommaire. | |
| - Liste des Figures. | |
| - Liste des Symboles. | |
| - Introduction Général. | I |

CHAPITRE I GENERALITES SIMPLIFIEES SUR LES TRANSISTORS MOS

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduction. | 01 |
| 2. Structure MOS. | 02 |
| 2.1. Constitution. | 02 |
| 2.2. Substrat. | 02 |
| 2.3. L'oxyde de silicium. | 03 |
| 2.3.1. Propriétés physico-chimiques du SiO ₂ | 03 |
| 2.3.2. Propriétés électriques du SiO ₂ | 06 |
| 2.4. Grille. | 07 |

CHAPITRE II CARACTERISTIQUES D'UNE STRUCTURE MOS

| | |
|---|-----------|
| 1. Introduction. | 08 |
| 2. Caractéristique C(V) D'une Structure Mos. | 09 |
| 3. Structure MOS idéale. | 10 |
| 3.1. Structure MOS idéale non polarisée. | 11 |
| 3.2. Structure MOS idéale polarisée. | 11 |
| 3.2.1. Régime d'accumulation. | 12 |
| 3.2.2. Régime de désertion. | 13 |
| 3.2.3. Régime d'inversion. | 14 |
| 3.3. Potentiel et champ électrique. | 17 |
| 3.4. Calcul de la charge Q_{sc} dans le semi-conducteur. | 18 |
| 3.5. Tension de seuil. | 20 |
| 4. Structure MOS réelle. | 21 |
| 4.1. Tension de bandes plates. | 21 |
| 4.2. Influence du travail de sortie du métal. | 21 |
| 4.3. Influence des charges dans l'isolant. | 22 |
| 4.4. Influence des états d'interface. | 23 |

CHAPITRE III: OPTOELECTRONIQUE PHOTO- DETECTEURS.

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduction. | 24 |
| 2. Définition. | 25 |
| 3. Réalisation et caractérisation. | 25 |
| 4. Montage du photo-détecteur. | 25 |
| 5. Composants d'émission/réception. | 26 |

| | |
|---|-----------|
| 5.1. Composants d'émission. | 26 |
| 5.2. Composants de réception. | 26 |
| 6. Le photo-détecteur. | 27 |
| 6.1. Principe de la photo-détection. | 27 |
| 6.2. Caractéristiques du photo-détecteur. | 27 |
| 7. Principe de fonctionnement de la photodiode. | 28 |
| 8. Les différents types des photo-détecteurs. | 28 |
| 8.1. PN Junction photodiodes. | 28 |
| 8.2. Photodiode PIN. | 30 |
| 9. Modes de fonctionnement photodiode. | 32 |
| 10. Paramètres de performance d'une photodiode. | 32 |
| 11. Objectifs et limites de la photodiode. | 32 |
| 12. Applications photodiodes. | 32 |

CHAPITRE IV RESULTANTS DE SIMULATION ET INTERPRETATIONS.

| | |
|--|-----------|
| 1. Introduction. | 33 |
| 2. Caractéristiques et capacités d'ATLAS. | 34 |
| 3. Différentes étapes de simulation. | 35 |
| 4. Description de la structure simulé. | 36 |
| 5. Résultats de la simulation. | 38 |
| 5.1. Effet de la température. | 38 |
| 5.2. Effet de rayonnement incident. | 41 |
| 5.3. Effet de la surface éclairée de la photodiode. | 41 |
| - Conclusion. | 42 |
| - Conclusion générale. | 43 |
| - Bibliographies. | 44 |

LISTE DE FIGURES

LISTE DE FIGURES:

| Titre | page |
|--|------|
| Chapitre I : Généralités simplifiées sur les transistors MOS | |
| Figure I.1: Schéma en coupe d'une structure MOS..... | 02 |
| Figure I.2 : Représentation de la cellule élémentaire du silicium..... | 03 |
| Figure I.3: Motif de base de la silice..... | 05 |
| Figure 4: Représentation de deux cellules de SiO ₄ voisines reliées. | 05 |
| Figure I.5: Représentation plane du réseau de la silice :(a) cristalline, (b) amorphe..... | 06 |
| Figure I.6 : Diagramme de bandes du système Si/ SiO ₂ | 06 |
| LISTE DE FIGURES | |
| Figure II.1: Caractéristiques normalisées capacité-tension d'une structure n-MOS..... | 10 |
| Figure II.2: Diagramme énergétique d'une structure p-MOS idéale non polarisée..... | 11 |
| Figure II.3: Diagrammes énergétiques, densités de charge, potentiels électriques, Champs électriques d'une structure MOS idéale polarisée..... | 14 |
| Figure II.4 : Concentration d'électrons et de trous en surface..... | 15 |
| Figure II.5 Diagramme de bandes pour les différents régimes de fonctionnement d'une structure MOS (sous polarisation positive)..... | 15 |
| Figure II.6 : Représentation schématique du théorème de Gauss..... | 20 |
| Figure II.7 : Effet des charges dans l'oxyde d'une structure MOS : (a)pour V _G =0 , (b)pour la tension de bandes plates. | 22 |

LISTE DE FIGURES

Chapitre III Optoélectronique / Photo-Détecteurs

| | |
|---|----|
| Figure III.1 : Une chaine de transmission par fibre optique. | 24 |
| Figure III.2: Schéma du circuit électronique du photo-détecteur construit..... | 26 |
| Figure III.3 Schéma de principe d'une diode `a jonction pn. | 29 |
| Figure III.4 : Principe de fonctionnement d'une photodiode PN..... | 29 |
| Figure III.5: Symbole de photodiode PIN..... | 30 |
| Figure III.6 :Principe de fonctionnement de la jonction PIN..... | 31 |

Chapitre IV Résultats De Simulation Et Interprétations

| | |
|---|----|
| FigureIV.1 : structure standard d'une photodiode PIN..... | 36 |
| Figure IV.2 : La structure Photodiode PIN en silicium..... | 37 |
| FigureIV.3 : Le maillage de la structure Photodiode PIN en silicium..... | 37 |
| FigureIV.4 : effet de la température sur la caractéristique I-V..... | 39 |
| Figure IV.5:Effet de la température sur la réponse spectrale | 40 |
| Figure IV.6: agrandissement de la région..... | 40 |
| Figure IV.7: Effet du rayonnement incident sur la caractéristique I-V.... | 41 |
| Figure IV.8: effet de la surface éclairée sur la caractéristique I-V..... | 42 |

Les symboles

Les symboles:

| | |
|-----------------------------------|--|
| MOS | métal-oxyde-semi-conducteur |
| MIS | métal-isolant semi-conducteur |
| SiO ₂ | l'oxyde de silicium |
| CVD | Chemical vapeur déposition |
| O ₂ ouH ₂ O | gazeux oxydant |
| θ | la valeur de l'angle |
| Å | Angström |
| E_{vide} | énergie du vide |
| EC_{sc} | Énergie du bas de la bande de conduction du semi-conducteur. |
| EV_{sc} | Énergie du haut de la bande de valence du semi-conducteur |
| EC_{ox} | Énergie du bas de la bande de conduction de l'oxyde, |
| EV_{ox} | Énergie du haut de la bande de valence de l'oxyde |
| ϵ_0 | permittivité du vide |
| Q_M | la charge de la grille |
| ΔQ_{sc} | la charge positive côté semi-conducteur |
| e_{ox} | un condensateur plan d'épaisseur |
| C_{ACC} | capacité de la couche isolante |
| x_d | une distance de l'interface |
| C_{ox} | un condensateur de capacité |
| C_{DES} | La capacité de la structure, |
| V_G | la tension appliquée sur la grille |
| V_{fb} | les travaux de sortie du métal et du semi -conducteur |
| Q_{ot} | charge électrique dans l'oxyde |
| Q_{it} | charge électroniques à l'interface |
| S | surface |
| t_{ox} | d'épaisseur d'oxyde |
| E_i | énergie de fermi intrinsèque |
| E_{FS} | énergie de fermi substrat |
| Ψ_S | potentiel de surface du semi -conducteur |
| N_a | la densité d'atomes accepteurs |
| q | la charge électronique |
| Ψ_B | le potentiel de volume |

Les symboles

| | |
|-----------------|---|
| ρ | la densité de charge |
| n_0 | Concentration d'électrons dans le volume du substrat |
| p_0 | Concentration de trous dans le volume du substrat |
| $n(x)$ | Concentration d'électrons dans la zone de charge d'espace à la position x |
| $p(x)$ | Concentration de trous dans la zone de charge d'espace à la position x . |
| N_{D+} | Concentration d'atomes donneurs ionisés. |
| N_{A-} | Concentration d'atomes accepteurs ionisés. |
| k | constante de Boltzmann |
| T | La température |
| λ_0 | longueur de Debye pour les trous |
| Q_s | La charge totale |
| V_{ox} | différence de potentiel |
| V_ψ | un potentiel de surface |
| x | l'abscisse d'un axe ayant pour origine l'interface |
| ϵ_{ox} | constante diélectrique |
| C_{ox} | la capacité de l'oxyde |
| Z_{CE} | la concentration d'électrons et de trous |
| Q_{DEP} | la charge de déplétion |
| V_T | tension de seuil |
| V_{FB} | tension de bandes plates (flat bands) |
| Q_{SS} | La charge piégée |

Introduction Générale:

Dans les premières années du vingtième siècle, les propriétés des semi-conducteurs ont été essentiellement découvertes. Beaucoup de ces propriétés ont été exploitées dans des dispositifs en micro-électronique. Au fil des années, les dispositifs ont été rendus manufacturables par les ingénieurs et les techniciens. Les semi-conducteurs se trouvaient encore au cœur de cette révolution, parmi eux le silicium qui est resté le dominateur par son abondance, et par son aptitude à la fabrication. L'un des grands domaines d'utilisation des semi-conducteurs est l'optoélectronique, qui se caractérise par l'interaction complexe des photons et des électrons à une échelle nanométrique.

Dans les débuts de télécommunications par fibre optique, le choix des sources s'est porté sur les émetteurs à semi-conducteurs à cause de leurs petites dimensions en rapport avec celles du cœur des fibres optiques, de la relative facilité que l'on a à moduler directement la lumière émise en agissant sur le courant de leur spectre optique relativement étroit et de leur faible consommation énergétique.

INTRODUCTION

Ce domaine, des structures en super-réseaux sont exploitées, les dimensions sont diminuées jusqu'à l'échelle du nanomètre, les lois quantiques sont explorées et des composants tout optique sont également considérés.

De plus, les échanges à travers ces systèmes allaient être de plus en plus nombreux et la demande de services de plus en plus élevée. Mais leur apparition a nécessité la conception et le développement de nouveaux composants optiques ou optoélectroniques performants et leurs applications à se diversifier.

Les applications de la photo-détection sont nombreuses : communications optiques fibrées ou en espace libre, capteur solaire, détecteur de présence, etc. Elles sont toutes fondées sur le même processus : transformer une puissance lumineuse en signal électrique. Lorsqu'il s'agit de transmettre des informations rapides, il faut que ce photo-détecteur réagisse très vite. Ces considérations élémentaires impliquent qu'un certain nombre de performances soient atteintes.

Les propriétés des composés semi-conducteurs III-V sont préférables, on citera par exemple quelques composés binaires et tertiaires GaN, InP, AlGaIn, AlGaAs, les jonctions PN et PIN sont largement utilisées comme dispositifs de communication optique, puisque le champ électrique présent dans la couche d'appauvrissement formée entre les deux régions (P et N) agissent pour séparer les paires électron-trou et pour augmenter le courant inverse de la diode. En outre, plus la taille de la couche d'appauvrissement est grande, plus la quantité d'absorption de lumière est élevée.

Ce manuscrit est constitué de trois chapitres, il est organisé comme suite :

- ♣ Le premier chapitre présente Généralités simplifiées sur les transistors MOS, nous évoquerons ensuite la variation du potentiel de surface en fonction de la charge totale dans le semi-conducteur et nous donnerons un aperçu général sur le fonctionnement du transistor MOS.
- ♣ Dans le deuxième chapitre portera sur les caractéristiques physiques et électriques de la structure MOS nous évoquerons ensuite la variation du potentiel de surface en fonction de la charge totale dans le semi-conducteur. Aussi, nous donnerons un aperçu général sur le fonctionnement du transistor MOS dans le cas idéal et les paramètres influant dans le cas réel.

INTRODUCTION

- ♣ Dans le troisième chapitre nous abordons les généralités sur les photodiodes en présentant les notions de base sur ces dispositifs et définissant les paramètres déterminant les performances de ces photodétecteurs.
- ♣ Dans le quatrième chapitre nous présentons des généralités sur SILVACO ATLAS.
- ♣ Enfin, le mémoire se termine par une conclusion générale récapitulant les résultats obtenus au cours de la simulation.

Chapitre I

Généralités simplifiées sur les transistors MOS

1. Introduction:

Une structure MOS (métal-oxyde-semi-conducteur) est une structure de type MIS (métal-isolant-semi-conducteur). En technologie silicium, cet isolant est l'oxyde de silicium (SiO_2) d'où le nom plus communément utilisé de structure MOS.

Cette structure est l'un des dispositifs les plus importants dans l'électronique actuelle, elle est la base des circuits intégrés, de ce fait, dans ce premier chapitre, nous présenterons brièvement la structure MOS, son diagramme énergétique ainsi que, les trois régimes de fonctionnement.

Nous évoquerons ensuite la variation du potentiel de surface en fonction de la charge totale dans le semi-conducteur et nous donnerons un aperçu général sur le fonctionnement du transistor MOS.

2. Structure MOS:

2.1 Constitution:

La dénomination capacité MOS (pour Métal-Oxyde-Semi-conducteur) résulte de la nature de l'isolant qui est alors un oxyde.

La structure MOS est constituée de trois couches de matériaux différents (comportant donc deux hétérojonctions), une couche métallique ou en silicium poly-cristallin fortement dopé constituant le substrat dite grille, un diélectrique représenté par une couche isolante d'oxyde de silicium (souvent appelée oxyde) et une couche isolante d'oxyde de silicium et une couche de silicium cristallin dopé p ou n formant le substrat (Figure I.1).

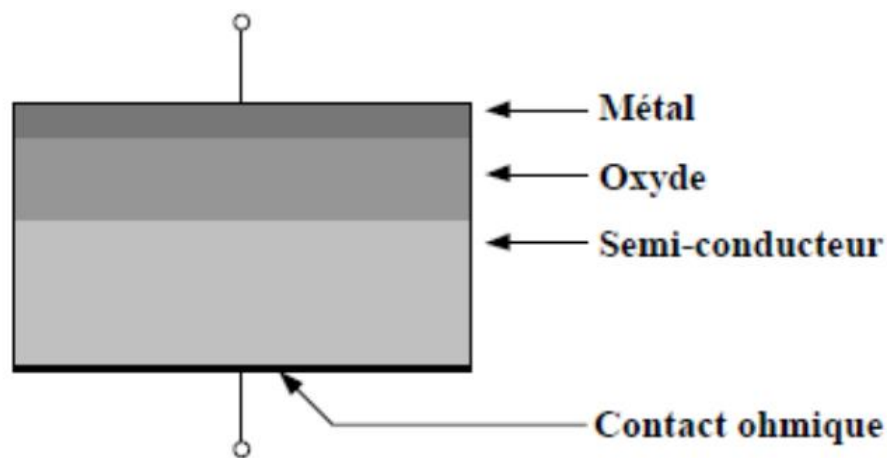


Figure I.1: Schéma en coupe d'une structure MOS [10].

L'épaisseur d'oxyde doit être suffisamment grande pour interdire toute circulation de courant lorsqu'une faible tension Continue est appliquée entre la grille et le substrat, mais suffisamment mince pour permettre la courbure des bandes d'énergie à l'interface isolant/substrat.

Le comportement d'une structure MOS vis-à-vis d'une perturbation électrique ne pourra pleinement s'étayer que sur la base d'une connaissance des procédés de fabrication [20] Dans la suite, la description succincte des trois matériaux constituant une structure MOS et de leurs interfaces aura essentiellement pour but d'apporter un éclairage général sur les notions de base de la structure MOS [20].

2.2 Substrat:

Le substrat est constitué de silicium cristallin dopé p ou n. Le dopage permet d'accroître un des types de porteurs de charge, électrons ou trous, au détriment de l'autre, on parle de structures p-MOS ou n-MOS.

Les structures MOS étudiées dans notre simulation est de type N (substrat type P) L'incorporation d'atomes accepteurs (donneurs) dans le substrat, s'effectue en deux étapes:

- Une première fois pour assurer le dopage.
- Une seconde fois après oxydation et recuit, à travers l'oxyde, afin d'ajuster la tension seuil des transistors.

Bien que la concentration des dopants dans l'oxyde soit estimée à une valeur très faible par les fabricants, la présence et l'influence de tels atomes n'est pas à exclure.

Le substrat est caractérisé par [2 2] :

- Largeur de bande interdite (1,1 eV).
- Type et concentration des dopants.
- Orientation du cristal à sa surface ([111] ou [100]) cette orientation conditionne.

La densité de défauts intrinsèques à l'interface substrat/isolant.

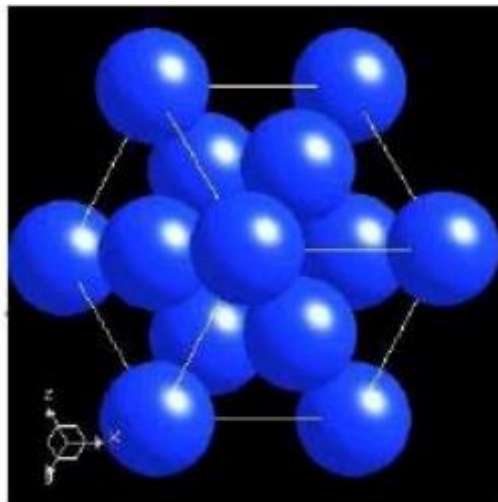


Figure I.2 : Représentation de la cellule élémentaire du silicium. [1]

2.3 L'oxyde de silicium:

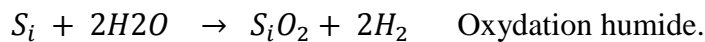
2.3.1 Propriétés physico-chimiques du SiO₂

a. Obtention du SiO₂:

La méthode la plus efficace et la plus utilisée pour la formation de la couche isolante est l'oxydation thermique du silicium. Elle est courante depuis les années 50 [2] car c'est elle qui donne les oxydes de meilleure qualité, même si d'autres procédés tels que le dépôt chimique en phase vapeur ou CVD (Chemical vapeur déposition) permettent au jour d'hui d'obtenir des oxydes de qualités équivalentes [22,25].

L'oxydation thermique du silicium est effectuée à hautes températures (800 à 1200 °C) [1] à l'intérieur d'un four parcouru par un courant gazeux oxydant (O₂ ou H₂O). La croissance de l'oxyde se fait en consommant du silicium (environ 1 nm de silicium consommé pour 2 nm d'oxyde formé) [1,25].

Selon la nature de l'oxydant, nous avons:



Pour obtenir une épaisseur de 2000 Å à 1000°C, il faut près de 8 heures en oxydation sèche, contre moins d'une heure en oxydation humide [19]. L'oxydation sèche, qui donne un oxyde de meilleure qualité et d'épaisseur mieux contrôlée, est réservée à l'obtention d'oxydes minces (de grille, piédestal des LOCOS...), tandis que l'oxydation humide est utilisée pour la formation d'oxydes épais (de masquage, de champ, d'isolation de grands substrats...) [22].

La croissance de l'oxyde et sa qualité dépendent de la qualité du substrat de silicium et en particulier de sa surface à partir de laquelle il doit croître. Une surface rugueuse donnera un oxyde de mauvaise qualité, d'où la nécessité d'un nettoyage de cette surface avant la croissance. C'est pour cela que des procédés de nettoyage sont mis en œuvre avant l'oxydation afin d'assurer une surface propre et lisse [22,23].

b. Structure physique du SiO₂:

La silice peut se trouver sous trois formes allotropiques:

- cristalline (ordre cristallographique à longue distance).
- vitreuse (ordre cristallographique à courte distance).
- amorphe (absence d'ordre cristallographique).

La structure obtenue par oxydation thermique est la silice vitreuse. Elle est amorphe dans le cas d'un mauvais contrôle de la croissance de l'oxyde.

L'unité structurale de base de la silice est un atome de silicium entouré de quatre atomes d'oxygène constituant les sommets d'un tétraèdre.

La silice est constituée d'un arrangement de tétraèdres SiO₄ reliés entre eux par l'intermédiaire des sommets oxygènes. Ces tétraèdres sont caractérisés par la distance

atomique Si-O (de 1,6 à 1,63 Å), et par la valeur de l'angle θ entre les liaisons O-Si-O, (θ varie de 110° à 180°, avec une valeur moyenne de 144° pour la silice amorphe [23]).

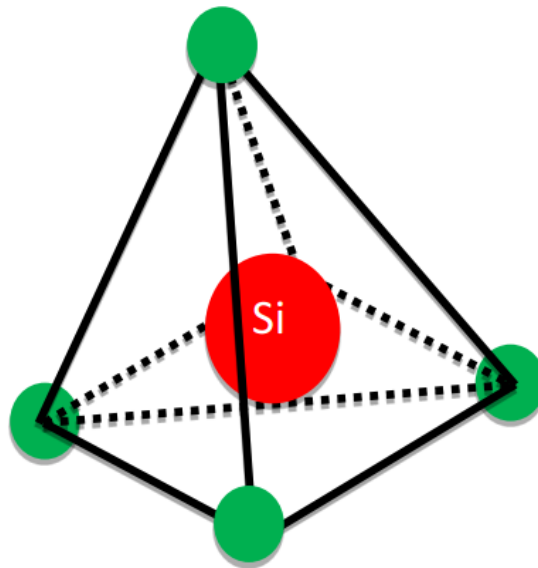


Figure I.3: Motif de base de la silice [15]

La silice est constituée d'un arrangement de tétraèdres SiO₄ reliés entre eux par l'intermédiaire des sommets d'oxygènes selon un angle θ (figure I.4). Ces tétraèdres sont caractérisés par la distance atomique Si-O (de 1,6 à 1,63 Å) et par la valeur de l'angle entre les liaisons O-Si-O [2] (de 110° à 180°, avec une valeur moyenne de 144° pour la silice amorphe).

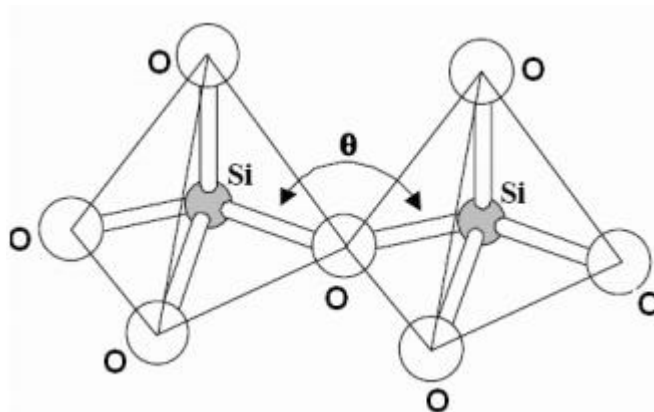


Figure 4 : Représentation de deux cellules de SiO₄ voisines reliées

Par un atome d'oxygène selon un angle de liaison θ .

La silice amorphe est représentée, classiquement, par un réseau aléatoire continu (figure I.5.b). Dans ce modèle, la distance interatomique et les angles O-Si-O sont conservés. La flexibilité du cristal est assurée par l'adaptation de l'angle θ entre tétraèdres voisins. Cette configuration atomique n'assure qu'un faible taux de remplissage (43%) [1] ce qui facilite la diffusion d'espèces étrangères comme les ions alcalins.

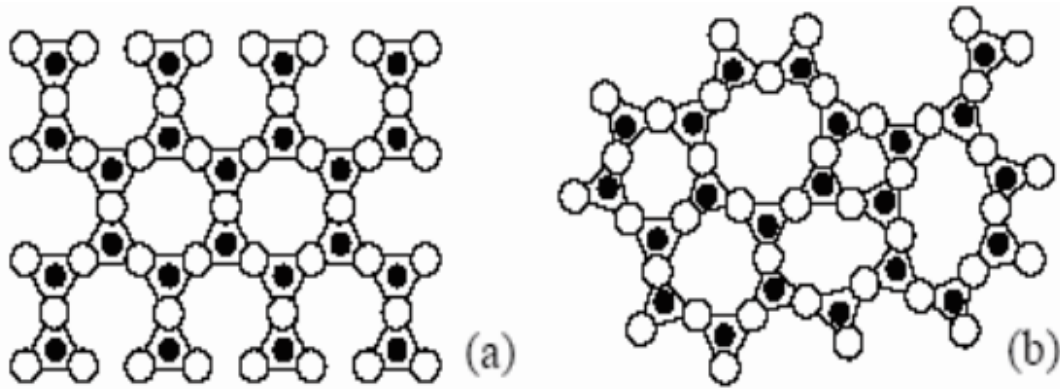


Figure I.5: Représentation plane du réseau de la silice :(a) cristalline, (b) amorphe.

2.3.2 Propriétés électriques du SiO₂:

a. Diagramme de bandes:

Le diagramme de bandes du système Si/SiO₂ est représenté sur la figure I.6. La largeur de la bande interdite de l'oxyde est importante (environ 9 eV) ce qui lui confère le caractère d'un bon isolant. Les valeurs des hauteurs de barrière vues par les porteurs du silicium sont de l'ordre de 3,2 eV pour les électrons (côté bande de conduction) et 4,6 eV pour les trous (côté bande de valence). L'oxyde est donc assez bien protégé contre l'injection des porteurs, en particulier de celle des trous.

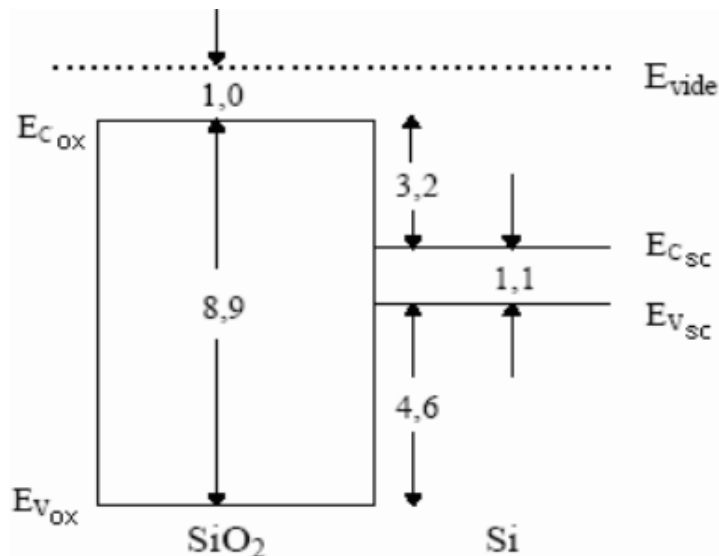


Figure I.6 : Diagramme de bandes du système Si/ SiO₂.

E_{vide} : Énergie du vide.

EC_{sc} : Énergie du bas de la bande de conduction du semi-conducteur.

EV_{sc} : Énergie du haut de la bande de valence du semi-conducteur.

EC_{ox} : Énergie du bas de la bande de conduction de l'oxyde,

EV_{ox} : Énergie du haut de la bande de valence de l'oxyde.

b. Caractéristiques électriques du SiO₂:

Nous donnons ci-dessous quelques caractéristiques de l'oxyde de silicium.

- la résistivité de l'oxyde est élevée, elle est de l'ordre de 10^{14} à $10^{16} \Omega \cdot \text{cm}$ [3], ce qui confirme sa propriété d'isolant électrique.
- à température ambiante, les valeurs de la conductivité et de la diffusivité thermique sont assez faibles. Elles sont, respectivement, de $0.014 \text{ Wcm}^{-1}\text{°C}$ et $0.006 \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ [2].
- La mobilité des porteurs dans le SiO₂ thermique et à température ambiante est de 10 à $20 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ pour les électrons et de l'ordre de $10^{-5} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ pour les trous (très inférieures à celles généralement rencontrées dans le silicium cristallin qui sont de $1400 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ pour les électrons et $400 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ pour les trous) [2].
- L'oxyde présente un constant diélectrique d'environ $3,9 \cdot \epsilon_0$ [3] (où ϵ_0 est la permittivité du vide).

2.4 Grille:

La grille des premières structures MOS était métallique. Afin de pallier les problèmes de diffusion d'impuretés (hydrogène ou ion alcalins) ou des atomes constituant la grille, dans la couche isolante, le métal a été remplacé progressivement par du silicium poly-cristallin fortement dopé p ou n (silicium dégénéré). La concentration élevée d'atomes dopants dans ce silicium écarte le niveau de Fermi en dehors de la bande interdite et confère à ce type de grille les mêmes propriétés qu'un métal [25].

Le dépôt du poly silicium sur l'isolant est obtenu par la technique de déposition chimique en phase vapeur, CVD (Chemical Vapeur Déposition), à basse température (620 °C). Les cristaux de silicium poly cristallin ont un diamètre de 0.03 à 0.30μ et une hauteur de la taille de la couche déposée.

Chapitre II

Caractéristiques D'une Structure Mos

1. Introduction:

Le transistor MOS (Métal – Oxyde - Semi-conducteur) est l'un des dispositifs les plus importants dans l'électronique actuelle, elle est la base des circuits intégrés, de ce fait, dans ce premier chapitre, nous présenterons brièvement la structure MOS, son diagramme énergétique ainsi que, les trois régimes de fonctionnement.

Ce chapitre portera sur les caractéristiques physiques et électriques de la structure MOS nous évoquerons ensuite la variation du potentiel de surface en fonction de la charge totale dans le semi-conducteur. Aussi, nous donnerons un aperçu général sur le fonctionnement du transistor MOS dans le cas idéal et les paramètres influant dans le cas réel.

2. CARACTERISTIQUE C(V) D'UNE STRUCTURE MOS:

En régime d'accumulation, si la charge de la grille augmente de ΔQ_M (par un petit accroissement de la tension négative appliquée sur la grille), il se produit une augmentation ΔQ_{sc} de la charge positive côté semi-conducteur au voisinage immédiat de l'interface Si/SiO₂.

La structure est donc équivalente à un condensateur plan d'épaisseur e_{ox} et de capacité C_{ACC} égale à celle de la couche isolante. Elle est donnée par la relation suivante :

$$C_{ACC} = C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{e_{ox}} \quad (\text{II.1})$$

Cette capacité est indépendante de V_G (tant qu'on reste dans le domaine de l'accumulation) car elle met en jeu le mouvement des porteurs majoritaires. Elle est aussi indépendante de la fréquence du signal de mesure jusqu'aux fréquences inverses du temps de relaxation.

En régime de désertion, toute variation ΔQ_M de la charge dans la grille est compensée par une variation de la largeur de la zone désertée dans le semi-conducteur (avancée ou recul de la frontière de la zone de charge d'espace) faisant apparaître ou disparaître une charge ΔQ_{sc} à une distance x_d de l'interface Si/SiO₂. La structure est équivalente à deux condensateurs en série : un condensateur de capacité C_{ox} , d'épaisseur e_{ox} et de permittivité ϵ_{sc} résultant de la présence de l'isolant et un condensateur de capacité C_D , d'épaisseur x_d et de permittivité ϵ_{sc} figurant la zone de déplétion. La capacité de la structure, C_{DES} , est donnée par:

$$C_{DES} = \left(\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_D} \right)^{-1} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{Avec : } C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{e_{ox}}, C_D = \frac{\epsilon_{sc}}{x_d} \text{ et } x_d = \left(\frac{2\epsilon_{sc}\Psi_s}{qN_a} \right)^{1/2} \quad [8]$$

La modulation de la charge met en jeu le mouvement des porteurs majoritaires, par conséquent C_{DES} est indépendante de la fréquence et ce, jusqu'aux fréquences inverses du temps de relaxation.

En régime d'inversion, la capacité de la structure dépend de la fréquence:

- en basses fréquences, l'accroissement de la charge positive ΔQ_M est compensé par l'augmentation de la charge dans la couche d'inversion (à l'interface Si/SiO₂) car les porteurs minoritaires ont le temps d'être générés thermiquement. La capacité dans ce cas est donnée par : $C_{INV} = C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{e_{ox}}$ (II.3)

- en hautes fréquences, ΔQ_M est équilibrée par une modulation de l'épaisseur de la zone déserte : la génération des porteurs minoritaires ne peut pas suivre les

CHAPITRE II: CARACTERISTIQUES D'UNE STRUCTURE MOS

modulations de polarisation, les porteurs majoritaires s'éloignent de la zone de charge d'espace augmentant ainsi sa largeur. La capacité en haute fréquence s'écrit :

$$C_{INV} = \left(\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{dl}} \right)^{-1} \quad (\text{II.3}) \quad \text{Avec: } C_{dl} = \frac{\epsilon_{SC}}{x_{dl}}$$

Dans le domaine de l'inversion, la capacité de la structure est indépendante de la polarisation aussi bien en hautes qu'en basses fréquences.

La figure II.1 montre les variations de la capacité en fonction de la tension V_G appliquée sur la grille, pour une structure MOS de type n.

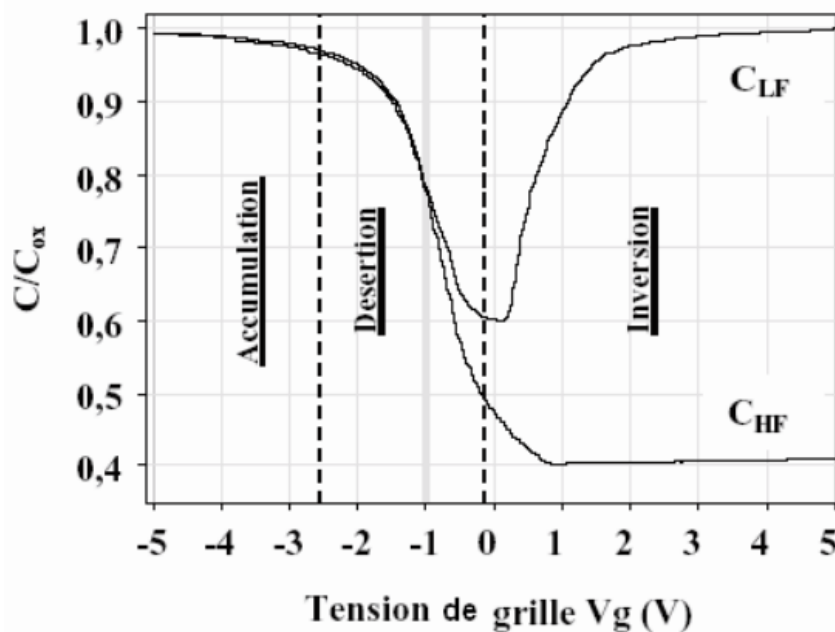


Figure II.1: Caractéristiques normalisées capacité-tension d'une structure n-MOS[1].

3. Structure MOS idéale:

Afin de mieux comprendre toute structure MOS, il est judicieux de considérer en premier lieu une structure MOS sans défauts qualifiée d'idéale.

Les caractéristiques de la structure MOS idéale sont les suivantes [24]:

- Il n'existe pas de différence entre les travaux de sortie du métal et du semi-conducteur ($V_{fb} = 0$).
- Il n'y a pas de charge électrique dans l'oxyde ($Q_{ot} = 0$).
- Il n'y a pas d'états électroniques à l'interface oxyde/semi-conducteur; c'est-à-dire que sous polarisation nulle, les bandes d'énergie sont plates ($Q_{it} = 0$). Les structures de bandes des trois matériaux vont s'ajuster par rapport à leur niveau du vide.

3.1 Structure MOS idéale non polarisée:

On considère une structure MOS d'épaisseur d'oxyde t_{ox} de surface S, dont la grille est en silicium poly-cristallin dopé n, le semi-conducteur est en silicium dopé p (le niveau de Fermi est proche du haut de la bande de valence) et l'isolant en oxyde de silicium. Dans l'hypothèse d'idéalité, il n'y a pas de champ électrique dans l'isolant ni dans le semi-conducteur.

L'hypothèse d'idéalité, il n'y a pas de champ électrique dans l'isolant ni dans le semi-conducteur.

Le diagramme énergétique d'une telle structure MOS est présenté sur la figure II.2, seul l'écart entre le niveau de Fermi et le haut de la bande de valence du semi-conducteur n'est pas à l'échelle. Nous pouvons d'abord remarquer la grande largeur de bande interdite de l'isolant EG_{OX} , estimée à 8,8 eV [24].

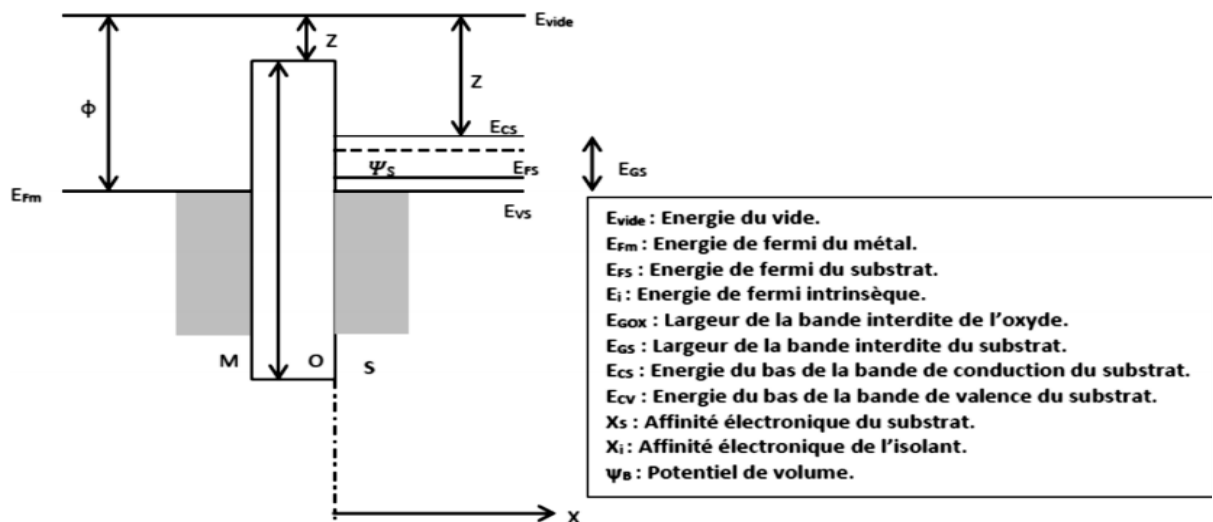


Figure II.2: Diagramme énergétique d'une structure p-MOS idéale non polarisée[14].

3.2 Structure MOS idéale polarisée :

En appliquant une différence de potentiel V_G (appelée tension grille) entre la grille et le semi-conducteur on entraîne la formation d'une zone de charge d'espace au voisinage de l'interface oxyde/semi-conducteur. A l'équilibre cette charge est compensée par une charge induite Q_M de signe opposé à l'interface isolant/grille.

La tension V_G peut être strictement continue ou comportant une composante alternative de faible amplitude (typiquement 10 mV) à basse ou haute fréquence.

Remarque : la densité d'électrons dans la grille est telle que l'extension spatiale de la charge induite est très faible, elle n'est prise en compte que dans le cas des structures MOS d'oxyde ultra-minces.

On distingue selon la position relative du niveau intrinsèque E_i par rapport à E_{FS} à l'interface Si/SiO₂, trois régimes de polarisation : les régimes d'accumulation, de désertion et d'inversion [20].

3.2.1 Régime d'accumulation :

Si on polarise la grille négativement par rapport au semi-conducteur (type p), les trous libres (porteurs majoritaires) du semi-conducteur s'accumulent à l'interface isolant/semi-conducteur.

La polarisation V_G appliquée à la grille se répartit entre une tension Ψ_S tenue par le semi-conducteur (Ψ_S traduit la courbure de bandes du substrat à l'interface isolant/semi-conducteur et est appelé potentiel de surface du semi-conducteur) et une tension V_{ox} tenue par l'isolant. On a alors [20,23]:

$$V_G = \Psi_S + V_{ox}; \quad \Psi_S < 0 \quad (\text{II.4})$$

Avec

$$q\Psi_S = EV_S(x=0) - EV_S(x \rightarrow \infty) \quad (\text{II.5})$$

Où x étant l'abscisse d'un axe ayant pour origine l'interface Si/SiO₂, dirigé vers le substrat et perpendiculaire à cette interface.

Les trous libres sont chassés de l'interface. Il se crée une large zone déserte correspondant à une charge d'espace négative côté semi-conducteur dont la densité est limitée par le dopage. Cette charge est équilibrée par la charge positive Q_M du métal (figure II.3.2.b), soit : $Q_M = -Q_{SC} = qN_a x_d$ (II.6) ; où q est la charge électronique, N_a la densité d'atomes accepteurs dans le semi-conducteur et x_d la largeur de la zone de charge d'espace dans le semi-conducteur en régime de déplétion.

Le champ électrique est linéaire dans le semi-conducteur (densité de charges uniforme) et plat dans l'isolant (figure II.3.2.d). Il en résulte un profil de potentiel parabolique dans le semi-conducteur et linéaire dans l'isolant (figure II.3.2.c). Contrairement au cas de l'accumulation, les bandes d'énergie se courbent vers le bas, ce qui éloigne les trous de l'interface (figure II.3.2.a)

3.2.2 Régime de désertion :

En polarisant la grille positivement par rapport au semi-conducteur, les trous libres sont chassés de l'interface. Il se crée une large zone désertée de charge mobile (ou de déplétion) correspondant à une charge d'espace négative coté semi - conducteur [20,23] dont la densité est limitée par le dopage. Cette charge est équilibrée par la charge positive Q_M du métal (figure II.3.2.b), soit:

$$Q_M = -Q_{SC} = qN_a x_d \dots (II.7)$$

où q est la charge électronique, N_a la densité d'atomes accepteurs dans le semi-conducteur et x_d la largeur de la zone de charge d'espace dans le semi-conducteur en régime de déplétion.

Le champ électrique est linéaire dans le semi-conducteur (densité de charges uniforme) et plat dans l'isolant (figure II.3.2.d). Il en résulte un profil de potentiel parabolique dans le semi-conducteur et linéaire dans l'isolant (figure II.3.2.c).

Contrairement au cas de l'accumulation, les bandes d'énergie se courbent vers le bas, ce qui éloigne les trous de l'interface (figure II.3.2.a)

3.2.3 Régime d'inversion:

Si on accroît la polarisation positive de la grille, les trous sont de plus en plus repoussés de l'interface Si/ SiO₂ pendant que les électrons y sont de plus en plus attirés. La concentration des trous va diminuer et celle des électrons va augmenter à la surface. La courbure des bandes vers le bas s'accroît et pour une certaine tension, le niveau de Fermi intrinsèque E_{Fi} passe sous le niveau E_{FSC} . Le niveau E_{CSC} à l'interface Si/SiO₂ devient plus proche du niveau de Fermi E_{FSC} que ne l'est le niveau E_{VSC} dans le volume (figure II.3.3.a).

Le semi-conducteur devient de type n en surface car les électrons minoritaires dans le volume deviennent majoritaires à l'interface. Il y a apparition d'une couche d'inversion entre la zone désertée et l'interface, soit une charge négative supplémentaire pour équilibrer la charge côté métal (ceci en plus de la charge dans la zone déserte)(Figure II.3.3.b), d'où :

$$Q_M = -(Q_{INV} + Q_{DEP}) = -Q_{INV} + qN_a x_{dl} \quad (II.8)$$

où x_{dl} est l'épaisseur de la zone déserte en régime d'inversion. La condition de forte inversion est définie quand la courbure des bandes est égale à deux fois la valeur de $(E_{Fi} - E_{FSC})$, ou encore: $\Psi_s = 2\Psi_B$ Ψ_s est le potentiel de surface, il traduit la courbure des bandes du semi-conducteur à l'interface; Ψ_B étant le potentiel de volume, il définit

CHAPITRE II: CARACTERISTIQUES D'UNE STRUCTURE MOS

la différence entre les niveaux E_{Fi} et E_{Fsc} . La surface est dite en faible inversion lorsque $\Psi_B < \Psi_s < 2\Psi_B$ et en forte inversion lorsque $\Psi_s > 2\Psi_B$ (figure II.4).

Le champ électrique et le potentiel sont représentés, respectivement, sur les figures (II.3.3.d) et (II.3.3.c).

La figure II.3: représente dans chacun des cas l'allure des bandes d'énergie, les densités de charge et leurs variations, le champ électrique et le potentiel électrique [24].

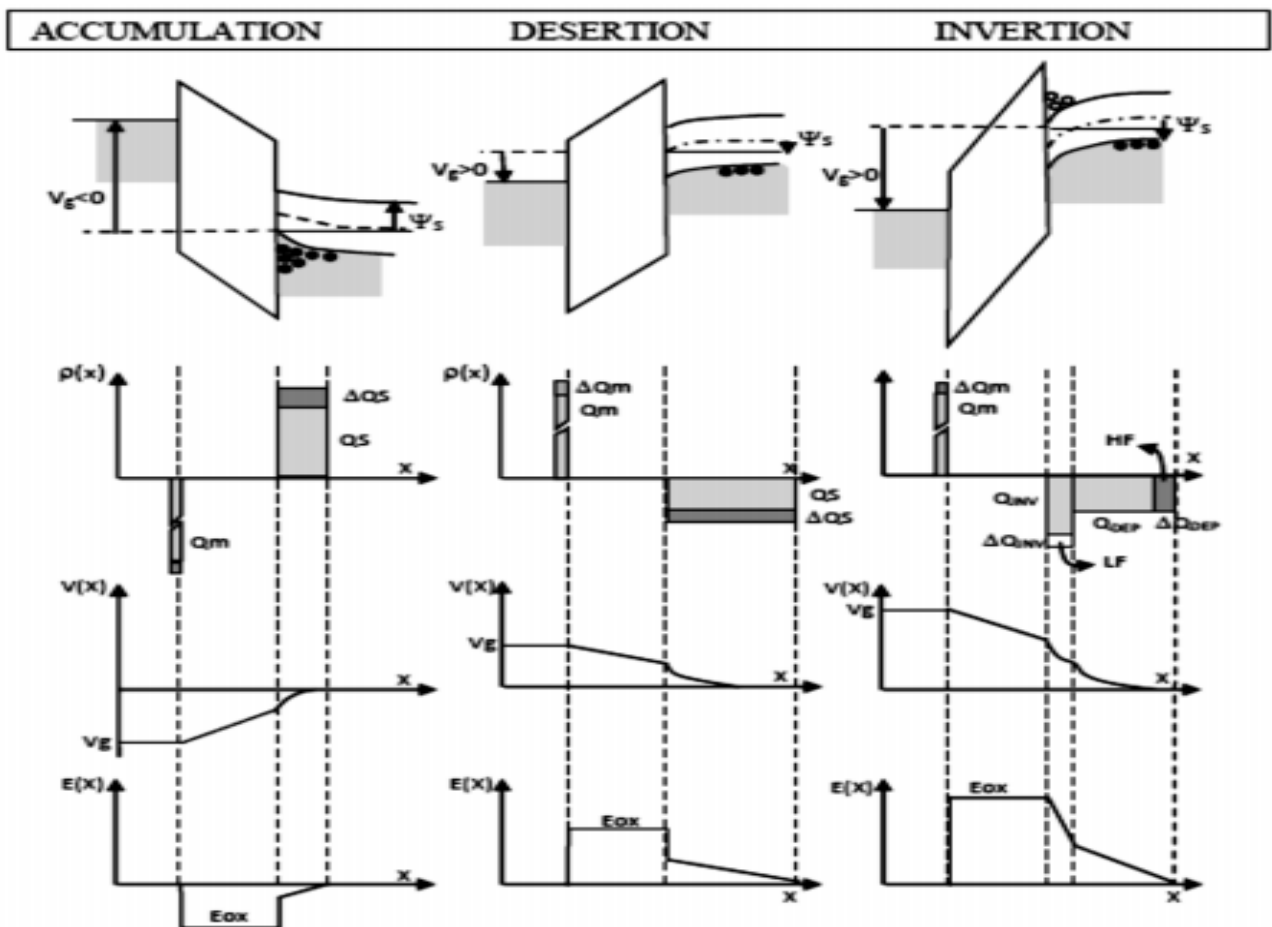


Figure II.3: Diagrammes énergétiques, densités de charge, potentiels électriques, Champs électriques d'une structure MOS idéale polarisée [24].

CHAPITRE II: CARACTERISTIQUES D'UNE STRUCTURE MOS

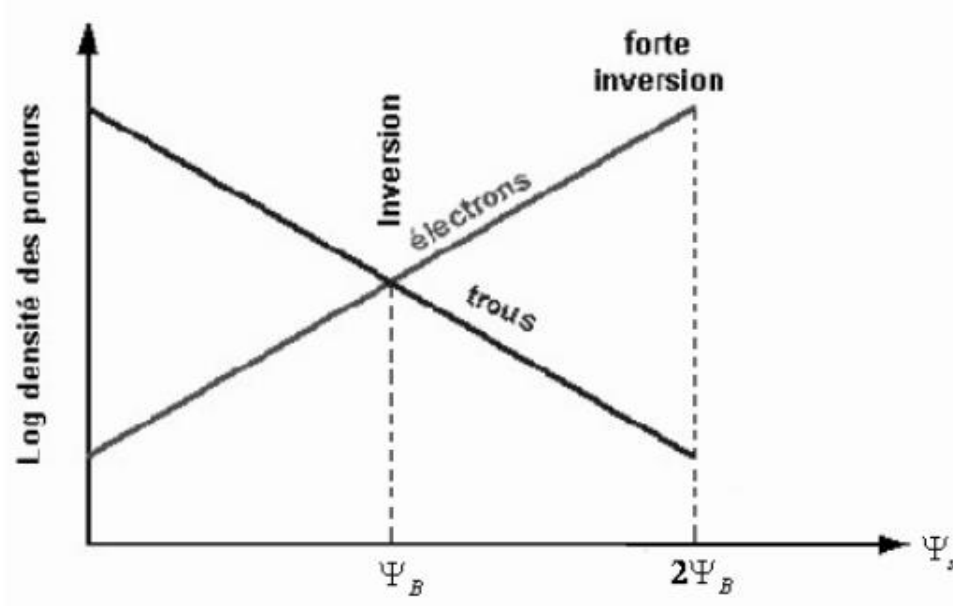


Figure II.4: Concentration d'électrons et de trous en surface

En fonction du potentiel de surface Ψ_s .

La figure II.5 résume les différents régimes de fonctionnement d'une structure n-MOS.

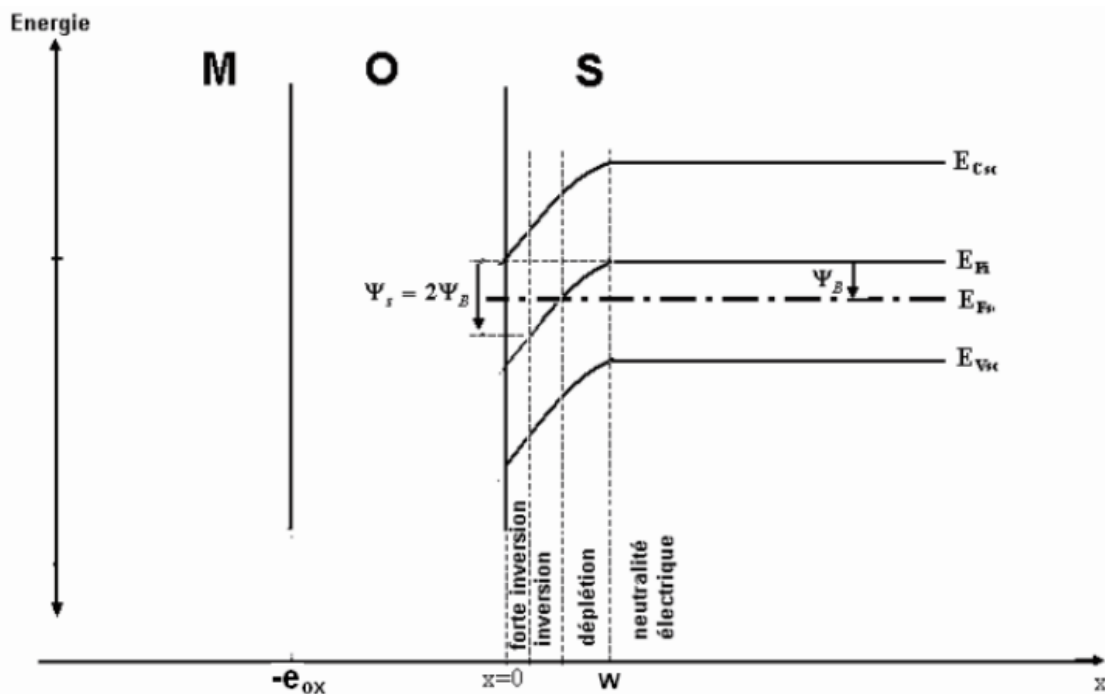


Figure II.5 Diagramme de bandes pour les différents régimes de fonctionnement d'une structure MOS (sous polarisation positive).

CHAPITRE II: CARACTERISTIQUES D'UNE STRUCTURE MOS

Le potentiel électrique régnant dans le semi-conducteur se déduit de la résolution de l'équation de Poisson [24]. $\Delta \Psi + \frac{\rho}{\epsilon_S}$ (II.9). où Ψ, ρ, ϵ_S sont respectivement le potentiel électrique, la densité de charge et la constante diélectrique du semi-conducteur. À une dimension on a [24] :

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_S} \quad (\text{II.10}).$$

Avec une densité de charge qui s'écrit : $\rho(x) = q(N_D + N_A + p(x) - n(x))$

$$\rho(x) = q(N_D + N_A + p(x) - n(x)) \quad (\text{II.11})$$

$$\text{et } p(x) = p_0 e^{-(q\Psi/KT)}, n(x) = n_0 e^{-(q\Psi/KT)}$$

Avec:

n_0 : Concentration d'électrons dans le volume du substrat.

p_0 : Concentration de trous dans le volume du substrat.

$n(x)$: Concentration d'électrons dans la zone de charge d'espace à la position x .

$p(x)$: Concentration de trous dans la zone de charge d'espace à la position x .

N_{D+} : Concentration d'atomes donneurs ionisés.

N_{A-} : Concentration d'atomes accepteurs ionisés.

k : constante de Boltzmann.

T : La température.

Dans l'hypothèse où tous les atomes accepteurs et donneurs sont ionisés à la température considérée (à l'ambiante les concentrations s'écrivent : $N_{D+} = n_0$;

$$N_{A-} = p_0, \text{ on a alors l'équation devient : } \rho(x) = q(n_0 - p_0 + p_0 e^{-(q\Psi/KT)} - n_0 e^{(q\Psi/KT)}) \quad (\text{II.12})$$

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_S} [(p_0 e^{-(q\Psi/KT)} - 1) - n_0 (e^{-(q\Psi/KT)} - 1)] \quad (\text{II.13})$$

En multipliant à gauche et à droite par : $2 \frac{d\Psi}{dx}$ et en remarquant que:

$$\frac{d}{dx} (E^2) = 2 \frac{d\Psi}{dx} \frac{d^2\Psi}{dx^2} \quad (\text{II.14})$$

On obtient :
$$2 \frac{d\Psi}{dx} \frac{d^2\Psi}{dx^2} = \frac{2qp_0}{\epsilon_S} \left[e^{-(q\Psi/KT)} \frac{d\Psi}{dx} - \frac{d\Psi}{dx} - \frac{n_0}{p_0} \left[\left(e^{(q\Psi/KT)} \frac{d\Psi}{dx} \frac{d\Psi}{dx} \right) \right] \right] \quad (\text{II.15})$$

$$E^2 = \left(\frac{KT}{q} \right)^2 \frac{2q^2 p_0}{KT \epsilon_S} \left\{ e^{-(q\Psi/KT)} + \frac{q\Psi}{KT} - 1 + \frac{n_0}{p_0} \left[e^{(q\Psi/KT)} - \frac{q\Psi}{KT} - 1 \right] \right\} \quad (\text{II.16})$$

Finalement, en posant : $\lambda_0 = \sqrt{\frac{KT \epsilon_S}{2p_0 q^2}}$ appelée longueur de Debye pour les trous. et une

fonction:
$$G \left(\Psi, \frac{n_0}{p_0} \right) = \sqrt{\left(e^{-(q\Psi/KT)} + \frac{q\Psi}{KT} - 1 \right) \frac{n_0}{p_0} \left[e^{(q\Psi/KT)} + \frac{q\Psi}{KT} - 1 \right]}$$

Le champ électrique s'écrit $E =$

$$\text{signe}(\Psi) \cdot \frac{2KT}{q\lambda_p} G \left(\Psi, \frac{n_0}{p_0} \right) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \text{signe}(\Psi \geq 0) = +1 \\ \text{signe}(\Psi < 0) = -1 \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

La charge totale Q_s par unité de surface se déduit en posant $\Psi = \Psi_s$ à la surface ($x = 0$). Par application du théorème de Gauss, le champ s'écrit aussi :

$$E_s = -\frac{Q_s}{\epsilon_S} \quad (\text{II.18}).$$

En combinant les équations (II.17) et (II.18) la charge peut s'écrire sous la forme :

$$Q_{sc} = \pm \left(\frac{KT}{e} \right) \frac{\epsilon_{SC}}{L_D} \left[e^{-eV_s/KT} + \frac{eV_s}{KT} - 1 + \frac{n_0}{p_0} \left(e^{eV_s/KT} - \frac{eV_s}{KT} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (\text{II.19})$$

3.3 Potentiel et champ électrique :

Quand une tension V_G est appliquée sur la grille de la structure définie précédemment, elle se décompose en une différence de potentiel V_{ox} supportée par l'oxyde et un potentiel de surface V_ψ dans la zone de charge d'espace du semi-conducteur, soit : $V_G + V_{ox} = V_\psi$ (II.20).

L'équation de Poisson s'écrit: $\Delta V + \frac{\rho}{\epsilon_{SC}} = 0$ (II.21) où ρ est la densité de

charges et ϵ_{SC} la constante diélectrique du semi-conducteur. A une dimension, l'équation

$$(II.21) \text{ s'écrit : } \frac{dE(x)}{dx} = \frac{d^2V(x)}{dx^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_{SC}} \quad (\text{II.22})$$

x étant l'abscisse d'un axe ayant pour origine l'interface Si/SiO₂, dirigé vers le substrat et perpendiculaire à cette surface. Dans l'isolant, et en raison de l'absence de charges, l'équation de Poisson s'écrit:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = 0 \Rightarrow \frac{dV(x)}{dx} = a \Rightarrow V(x) = ax + b \quad (\text{II.23}) \quad \text{où } a \text{ et } b \text{ sont des constantes.}$$

$$\text{En } x = 0, V(x = 0) = \Psi_s \Rightarrow b = \Psi_s$$

En $x = -e_{ox}$, $V(x = -e_{ox}) = V_G \Rightarrow a = -\frac{V_G - \Psi_s}{e_{ox}}$

La variation du potentiel sera donc donnée par :

$$V(x) = -\frac{V_G - \Psi_s}{e_{ox}}x + \Psi_s \text{ (II.24) où } e_{ox} \text{ est l'épaisseur de l'oxyde.}$$

En ajoutant et retranchant V_G à cette équation, celle-ci peut se mettre sous la forme

$$V(x) = V_G - \frac{V_G - \Psi_s}{e_{ox}}(x + e_{ox}) \quad \text{(II.25)}$$

Sachant que: $V_G - \Psi_s = V_{ox} = \frac{Q_m}{C_{ox}} = -\frac{Q_{sc}}{C_{ox}}$: avec $C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{e_{ox}}$, où C_{ox} est la capacité de l'oxyde et ϵ_{ox} sa constante diélectrique.

$$\text{Le potentiel dans l'oxyde, } (x) \text{ , s'écrit : } V(x) = V_G + \frac{Q_{sc}}{\epsilon_{ox}}(x + e_{ox}) \text{ (II.26)}$$

La dérivée de l'expression (II.26) montre que le champ électrique dans $E(x)$ l'isolant est constant et donné par: $E(x) = \frac{dV(x)}{dx} = -\frac{Q_a}{\epsilon_{sc}}$ (II.27)

Dans le semi-conducteur, en supposant le dopage homogène et la déplétion totale sur une profondeur W , la densité de charges de déplétion s'écrit : $\rho(x) = -eN_a$ (II.28)

$$\text{L'équation de Poisson s'écrit, alors : } \frac{d^2V(x)}{dx^2} = \frac{eN_a}{\epsilon_{sc}} \quad \text{(II.29)}$$

En intégrant, avec la condition en $E = 0$; $x = W$, nous obtenons:

$$\frac{dV(x)}{dx} = \frac{eN_a}{\epsilon_{sc}}(x - W) \text{ (II.30)}$$

$$\text{Le potentiel de surface est obtenu pour } x = 0. \text{ Il est donné par : } \Psi_s = \frac{eN_aW^2}{2\epsilon_{sc}} \text{ (II.31)}$$

Le champ électrique dans le semi-conducteur est linéaire. Il est obtenu à partir de l'équation (I.26). Il s'écrit : $E(x) = -\frac{eN_a}{\epsilon_{sc}}(x - W)$ (II.32)

$$\text{Le champ électrique en surface, } E_s \text{ est donné par : } E_s = \frac{eN_aW}{\epsilon_{sc}} \quad \text{(II.33)}$$

3.4 Calcul de la charge Q_{sc} dans le semi-conducteur:

Dans le semi-conducteur et en un point d'abscisse x , la densité de charges est donnée par : $\rho(x) = e(N_d^+(x) - N_a^-(x) + p(x) - n(x))$ (II.34). où $n(x)$ et $p(x)$ sont, respectivement, la concentration d'électrons et de trous dans la Z_{CE} à la position, N_d^+ la concentration d'atomes donneurs ionisés et N_a^- la concentration d'atomes accepteurs ionisés ; $n(x)$ et $p(x)$ sont donnés par :

CHAPITRE II: CARACTERISTIQUES D'UNE STRUCTURE MOS

$n(x) = n_0 e^{-eV(x)/KT}$ (I.32) ; $p(x) = p_0 e^{-eV(x)/KT}$ (II.35), où n_0 et p_0 sont, respectivement, la concentration d'électrons et de trous dans le volume du substrat, k la constante de Boltzman et T la température absolue.

En supposant que tous les atomes donneurs et accepteurs sont ionisés et que le semi-conducteur est dopé de manière uniforme, nous pouvons écrire :

$$N_d^+(x)N_a^-(x) = n_0 - p_0 \quad (\text{II.36})$$

L'équation de Poisson s'écrit alors

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -\frac{e}{\epsilon_{SC}} [p_0(e^{-eV(x)/KT} - 1) - n_0(e^{eV(x)/KT} - 1)] \quad (\text{II.37})$$

Le terme de gauche de l'équation (II.37) peut s'écrire :

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{dV(x)}{dx} \right) = \frac{d}{dV(x)} \left(\frac{dV(x)}{dx} \right) \frac{dV(x)}{dx} = \frac{dE(x)}{dV(x)} E(x) \quad (\text{II.38})$$

L'équation (II.37) devient:

$$E(x)dE(x) = -\frac{e}{\epsilon_{SC}} [p_0(e^{-eV(x)/KT} - 1) - n_0(e^{eV(x)/KT} - 1)]dV(x) \quad (\text{II.39})$$

En intégrant cette équation depuis la région neutre du semi-conducteur jusqu'à la région de la charge d'espace, le champ électrique varie de $E = 0$ jusqu'à une valeur $E(x)$ non nulle et le potentiel varie de $V = 0$ à une valeur $V(x)$ non nulle. Nous obtenons ainsi:

$$\frac{1}{2}E^2(x) = -\frac{e}{\epsilon_{SC}} \left[p_0 \left(-\frac{KT}{e} e^{-eV(x)/KT} - V(x) \frac{KT}{e} \right) - n_0 \left(-\frac{KT}{e} e^{-eV(x)/KT} + V(x) \frac{KT}{e} \right) \right] \quad (\text{II.40})$$

$$E^2(x) = \left(\frac{KT}{e} \right)^2 \frac{2e^2 p_0}{KT \epsilon_{SC}} \left[\left(e^{-eV(x)/KT} + \frac{eV(x)}{KT} - 1 \right) + \frac{n_0}{p_0} \left(e^{eV(x)/KT} \frac{eV(x)}{KT} - 1 \right) \right] \quad (\text{II.41})$$

$$\text{En posant: } L_D = \left(\frac{KT \epsilon_{SC}}{2e^2 p_0} \right)^{1/2} \quad (\text{II.42})$$

$$\text{et } F \left(V(x), \frac{n_0}{p_0} \right) = \left[\left(e^{-eV(x)/KT} + \frac{eV(x)}{KT} - 1 \right) + \frac{n_0}{p_0} \left(e^{eV(x)/KT} \frac{eV(x)}{KT} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad (\text{II.43})$$

où F est une fonction et L_D la longueur de Debye (la longueur de Debye est définie comme la distance en dessus de laquelle une séparation significative des charges peut avoir lieu), et en injectant les équations (II.43) et (II.42) dans l'équation (II.41), nous obtenons : $E^2(x) = \pm \left(\frac{KT}{e} \right)^2 \frac{1}{L_D^2} F^2(V(x))$ (II.44) d'où : $E(x) = \pm \frac{KT}{eL_D} F(V(x))$ (II.45).

Le signe (+) correspond au régime de désertion ou d'inversion et le signe (-) au régime d'accumulation.

$$\text{Le champ électrique à la surface sera donné par : } E_s = \pm \frac{KT}{eL_D} F(\Psi_s) \quad (\text{II.46})$$

CHAPITRE II: CARACTERISTIQUES D'UNE STRUCTURE MOS

A partir du champ à la surface, nous pouvons calculer la densité totale de charges dans le semi-conducteur, ceci en appliquant le théorème de Gauss et en prenant comme surface fermée un cylindre de section $s = 1$, d'axe x et dont une base est à la surface du semi-conducteur et l'autre dans la région neutre (figure II.6),

$$\text{Soit } \int_{\vec{E}} \cdot d\vec{s} = \frac{Q_{sc}}{\epsilon_{sc}} \quad (\text{II.47})$$

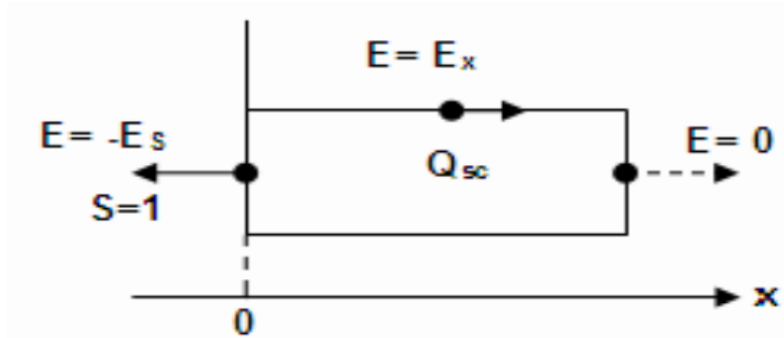


Figure II.6 : Représentation schématique du théorème de Gauss

Le champ électrique est nul dans la région neutre du semi-conducteur ainsi que sur les faces latérales du cylindre. L'équation (II.46) se réduit donc à : $E_s = -\frac{Q_{sc}}{\epsilon_{sc}}$ (II.48)

En combinant les équations (II.44) et (II.47), la charge dans le semi-conducteur va s'écrire : $Q_{sc} = \pm \frac{\epsilon_{sc} K T}{e L_D} F(\Psi_s)$ (II.49)

3.5 Tension de seuil:

La tension de seuil est définie comme la tension de polarisation de la grille nécessaire à l'établissement du régime de forte inversion. C'est donc la valeur de la tension V_G entraînant $\Psi_s = 2\Psi_B$. La tension de la grille est donnée par :

$$V_G = \Psi_s + \frac{Q_G}{C_{ox}} = \Psi_s - \frac{Q_{sc}}{C_{ox}} \quad (\text{II.50})$$

Lorsqu'on atteint le seuil de forte inversion, la charge dans le semi-conducteur est essentiellement de déplétion. Elle est donnée par [7]:

$$Q_{sc} \approx Q_{DEP} = -(2eN_a\epsilon_{sc}\Psi_s)^{1/2} \quad (\text{II.51})$$

$$\text{donc } V_G = \Psi_s + \frac{(4N_a\epsilon_{sc}\Psi_s)^{1/2}}{C_{ox}} \quad (\text{II.52})$$

La tension de seuil de la structure, V_T , sera donnée par :

$$V_T = 2\Psi_B + \frac{(4N_a\epsilon_{sc}\Psi_B)^{1/2}}{C_{ox}} \quad (\text{II.53})$$

Ainsi, la tension de seuil dépend du dopage du substrat, de la capacité de l'oxyde et de la température.

4. Structure MOS réelle:

4.1 Tension de bandes plates:

La condition d'égalité des niveaux de Fermi du métal et du semi-conducteur de type p : $\phi_m = X_s + E_{GS}/2q + \Psi_B$ ne peut être respectée que pour un dopage particulier du substrat.

En dehors de cette situation, la structure de bandes à l'interface Si/SiO₂ est courbée. A cette déformation s'ajoute l'influence des états d'interfaces Q_{it} (et de la charge éventuelle dans l'oxyde Q_{ox}) qui introduisent une différence de potentiel supplémentaire. En conséquence, au sein d'une structure MOS réelle, il existe un champ électrique dans l'oxyde en absence de toute polarisation [24,25].

Pour retrouver une situation de bandes plates, il faut appliquer entre la grille et le semi-conducteur une différence de potentiel V_{FB} appelée tension de bandes plates (flat bands). Les caractéristiques idéales capacité-tension s'en trouvent translatées suivant l'axe

des tensions. On a:
$$\frac{\partial V_g}{\partial \Psi_s} = \frac{1}{C_{ox}} \frac{\partial Q_s}{\partial \Psi_s} + \frac{\partial Q_s}{\partial \Psi_s} = \frac{C_s \cdot C_{ox}}{C_s + C_{ox}} \quad (\text{II.54})$$

$$\text{Finalement } C = \Psi_s \left| \frac{\partial \Psi_s}{\partial V_g} \right| = \frac{C_s \cdot C_{ox}}{C_s + C_{ox}} \quad (\text{II.55})$$

La tension de bandes plates s'écrit (en absence de charge d'oxyde) :

$$V_{FB} = \frac{\phi_m - \phi_s}{q} - \frac{Q_{it}}{C_{ox}} \quad \text{Avec : } \phi_s = X_s + E_{GS}/2q + \Psi_B$$

et Q_{it} densité des états d'interface (ou Q_{ss} dans littérature pour « surface state »).

Pour une capacité réelle le champ dans l'oxyde vaut [24,25]:

$$E_{ox} = \frac{V_g - \psi_s(V_g) - V_{FB}}{t_{ox}} \quad (\text{II.56})$$

C'est cette dernière relation que l'on utilisera pour le calcul de champ électrique dans l'oxyde.

4.2 Influence du travail de sortie du métal :

La condition d'égalité des niveaux de Fermi du métal et du semi-conducteur ne peut être respectée que pour un dopage particulier du semi-conducteur ($\Phi_{ms} < 0$ en général). Si le travail de sortie du métal est différent de celui du semi-conducteur et si la structure n'est pas polarisée ($V_G = 0$), les bandes ne peuvent pas être plates, elles sont courbées à l'interface Si/SiO₂. Il règne un champ électrique dans l'isolant et dans le semi-conducteur au voisinage de l'interface.

CHAPITRE II: CARACTERISTIQUES D'UNE STRUCTURE MOS

Pour retrouver une situation de bandes plates, il faut appliquer entre la grille et le semi-conducteur une tension V_{FB1} dite tension de bandes plates (flat bands). Cette tension est

$$\text{donnée par [8]: } V_{FB1} = \frac{\Phi_M - X_{SC} - (E_{CSC} - E_{FSC})}{q} \quad (\text{II.57}).$$

Les caractéristiques idéales capacité-tension sont translatées de V_{FB1} sans changer de forme.

4.3 Influence des charges dans l'isolant:

Les isolants des structures MOS contiennent généralement des charges électriques qui vont exercer une influence électrostatique sur les porteurs du semi-conducteur. Dans la silice, ces charges sont positives et leur densité varie de 10^{10} à 10^{12} charges par cm^2 pour un oxyde de l'ordre de 10^3 \AA d'épaisseur [8].

Considérons seulement la charge Q_0 en x_0 . Pour assurer la neutralité du système, cette charge positive va attirer des charges négatives à la surface de la grille et du semi-conducteur (figure II.7.a). Pour rétablir un régime de bandes plates, il faut de nouveau appliquer à la grille une tension négative (figure II.7-b). Plus cette tension négative augmente, plus le champ électrique à la surface du semi-conducteur diminue jusqu'à ce qu'il s'annule pour la valeur V_{FB2} de la tension de bandes plates qui est donnée par [9]

$$: V_{FB2} = E_0 x_0 = - \frac{Q_0}{\epsilon_{ox}} x_0 \dots (\text{II.58}).$$

V_{FB2} dépend de la densité de charges Q_0 et de leur position dans l'oxyde : plus la charge est profonde, plus la tension compensatoire qu'il faut appliquer à la grille est importante.

Dans le cas général d'une distribution de charges arbitraire dans l'oxyde selon une fonction $\rho(x)$, V_{FB2} sera donnée par [9]: $V_{FB2} = - \frac{1}{\epsilon_{ox}} \int_0^{x_0} x \rho(x) dx \dots (\text{II.59}).$

La courbe capacité-tension idéale sera translatée V_{FB2} de.

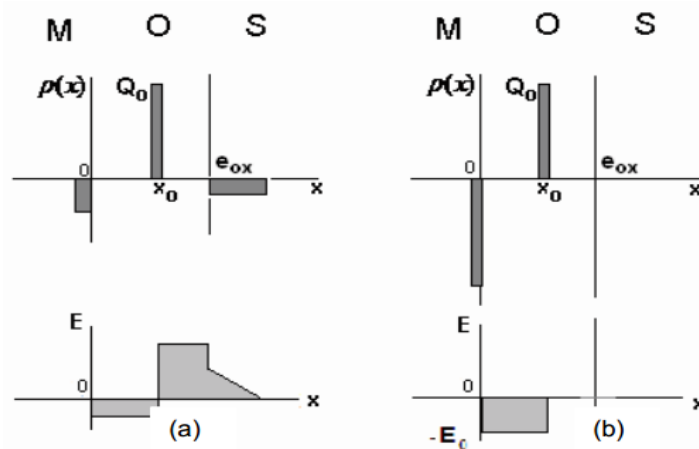


Figure II.7: Effet des charges dans l'oxyde d'une structure MOS : (a) pour $V_G=0$, (b) pour la tension de bandes plates.

4.4 Influence des états d'interface :

Ces états sont localisés à l'interface Si/SiO_2 et introduisent des niveaux d'énergie dans la bande interdite du semi-conducteur. Tous les états dont les niveaux sont situés en dessous du niveau de Fermi sont pleins. La charge piégée dans ces états (Q_{SS}) va intervenir à côté de la charge dans le semi-conducteur (Q_{SC}) pour équilibrer la charge Q_M de la grille. $Q_M = Q_{SS} + Q_{SC}$ (II.60).

Dans ce cas, toute augmentation δQ_M de la charge sur la grille ne se répercutera que partiellement sur la charge dans le semi-conducteur (δQ_{SC}) puisqu'un certain nombre d'états d'interface vont se charger δQ_{SS} . $\delta Q_M = \delta Q_{SS} + \delta Q_{SC} \dots$ (II.61).

La courbure des bandes sera moindre en présence d'états d'interface qu'en absence de ces derniers.

Chapitre III

Optoélectronique / Photo-Détecteurs

1. Introduction

Le photo-détecteur est un composant à base de semi-conducteur, il absorbe de l'énergie optique et la convertit en énergie électrique, qui s'appelle le photo-courant très utilisé dans la transmission optique et les systèmes de mesure.

Dans ce chapitre nous présentons quelques généralités sur la photo détection. Nous exposons aussi les lois générales de la photo détection, avec les équations qui définissent les paramètres déterminant les performances de la photo détectrice. Nous présentons les différents types de pot détecteurs utilisés.

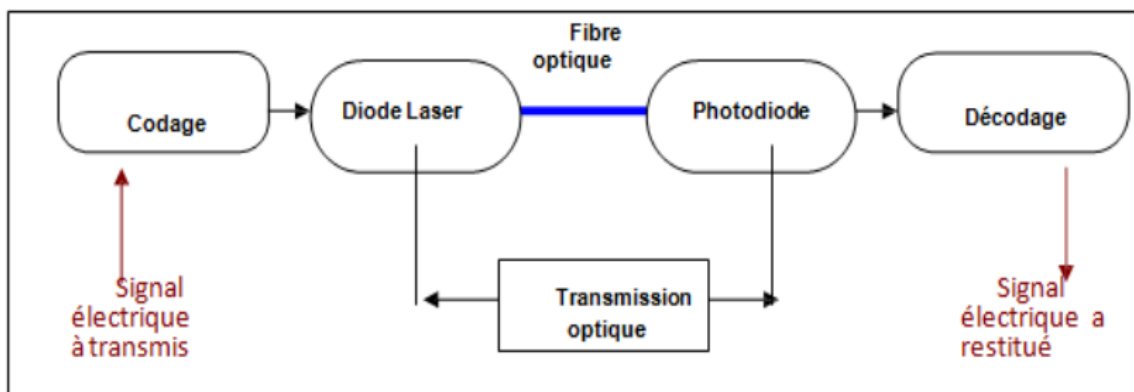


Figure III.1 : Une chaîne de transmission par fibre optique [19]

2. Définition:

Un photo détecteur absorbe un faisceau lumineux et le convertit en un signal électrique (photo courant). Le photo détecteur est un semi-conducteur de jonction PN polarisé en inverse permet la conversion du signal optique reçu (les photons) en signal électrique par l'effet photoélectrique. Sous l'effet d'un photon d'énergie suffisante, un électron est arraché de la bande de valence et passe dans la bande de conduction, produisant une paire de porteurs libre électron-trou. Ces porteurs sont dissociés par le champ électrique et participent à la création d'un photo courant.

Les photodiodes peuvent être classées en deux catégories : celles qui n'ont aucun gain interne PN et PIN, et celles qui ont un gain interne AVALANCHE (APD) [16].

3. Réalisation et caractérisation:

Les photo détecteur sont des outils indispensables à toute expérience d'optique. Les photo détecteur sont composés d'une photodiode (un dipôle qui délivre un Courant proportionnel à la puissance lumineuse qu'il reçoit) et d'un circuit électronique qui permet d'obtenir, en sortie, une tension proportionnelle à la puissance lumineuse.

Pour nos expériences, nous avons besoin d'une photo détectrice relativement rapide (qui peut détecter des signaux à haute fréquence, de l'ordre du GHz), ce qui est relativement cher à l'achat. Le photo détecteur utilisé dans l'ensemble de nos expériences a donc été construit au laboratoire [17].

4. Montage du photo-détecteur:

Le photo détecteur que nous avons construit est largement inspiré de. Le schéma du circuit est donné en Figure III.2. La photodiode utilisée est une photodiode Fermionics FD150S2. Il s'agit d'une photodiode $I_n G_a A_s$ (de type PIN), dont la zone active a un diamètre de 150 μm . Ce type de photodiode fonctionne très bien dans l'infrarouge, ce qui est bien le domaine des lasers utilisés. Ce montage permet en principe d'obtenir deux signaux : un signal DC (courant continu). Cette séparation effectuée par les bobines L1 et L2 et par le condensateur C2. Quelques modifications ont été effectuées par rapport au photo détecteur de, en particulier l'ajout d'une bobine supplémentaire L2 en série avec L1 [17].

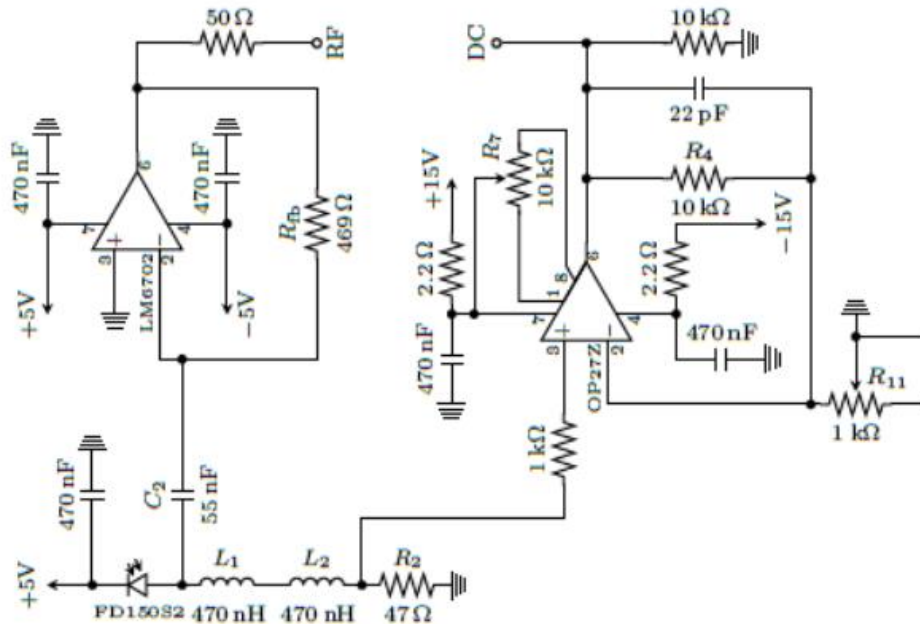


Figure III.2: Schéma du circuit électronique du photo détecteur construit. Les résistances R7 et R11 sont des potentiomètres pour lesquelles les valeurs indiquées ne correspondent pas aux valeurs effectives dans le circuit [17].

5. Composants d'émission/réception:

Le principe de fonctionnement des composants (l'interaction lumière/matière stimulée, et absorption), ainsi que sur la physique des dispositifs électroniques, la jonction PN en particulier [24].

5.1 Composants d'émission:

On distingue classiquement les diodes électroluminescentes (DEL) et les diodes laser (DL) selon le type de mécanisme mis en jeu pour l'émission de lumière (émission spontanée pour les DEL et émission stimulée pour les DL). Dans le cas des liaisons haut débit, seules les diodes laser, nettement plus performantes, sont utilisées. Dans une description de type « système » des liaisons par fibre optique, les diodes laser interviennent essentiellement par leurs caractéristiques statiques et par leurs caractéristiques dynamiques [23].

5.2 Composants de réception:

La détection est un point clef des liaisons par fibre optique. En général, les signaux reçus sont très faibles (typiquement le nW) et rapides (le débit binaire des liaisons peut atteindre 40 Gbits. S⁻¹). Il est donc nécessaire que le système de détection soit sensible et rapide.

Le rayonnement incident crée, par génération bande à bande, des paires électron-trou séparées par un champ électrostatique, puis collectées par des contacts électriques. Ce flux de charges donne lieu à un photo courant I_{ph}.

Le système de détection comprend, en plus de l'élément photo détecteur proprement dit (par exemple une photodiode PN, PIN, PDA), un ensemble de circuits électroniques, à commencer par un préamplificateur faible bruit. Du point de vue des liaisons par fibre, les principaux paramètres qui interviennent pour caractériser la détection sont : la longueur d'onde de coupure, la sensibilité du détecteur S_λ (A/W) qui chiffre le rapport entre le photo courant recueilli et la puissance optique incidente, le rendement quantique, et le courant d'obscurité du détecteur (les caractéristiques des photo détecteurs) [19,26.24].

6. Le photo-détecteur:

Un photo détecteur converti les photons incidents en courant d'électrons ; il transforme le signal optique en signal électrique. Une bonne photo détecteur doit être très sensible à la longueur d'onde utilisée générer un minimum de bruit et doit être suffisamment rapide. Les photo- détecteurs à semi-conducteurs sont les plus utilisés car ils sont très rapides, peu coûteux et de dimension compatible avec les fibres optiques [14].

6.1 Principe de la photo-détection:

Les photons transmis par la fibre pénètrent dans le détecteur, constitué d'un matériau Semi-conducteur. Absorbés, ils peuvent provoquer le passage d'électrons d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Dans cette dernière, les électrons moins liés deviennent libres. Le photon a donc laissé place à une paire électron-trou.

Une différence de potentiel est appliquée afin d'empêcher l'électron de retomber dans son état le plus stable. Sous l'effet du champ électrique, les deux catégories de porteurs sont séparées et entraînées vers des zones où ils sont majoritaires (nommées P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photo courant. Le nombre de paires électron-trou est égal au nombre de photons absorbés.

Pour effectuer la phot détection en évitant les recombinaisons des paires électron-trou, il est nécessaire que les photons soient absorbés dans une zone dépourvue de porteurs mobiles, assimilable à une zone de charge d'espace d'une jonction PN. Pour favoriser le rendement quantique, il est préférable que cette zone soit large. D'où l'intérêt de la photodiode PIN [20].

6.2 Caractéristiques du photo-détecteur :

Une photo détecteur est caractérisé par :

- **Le rendement quantique (η):** représente Le rapport du nombre de paires de porteurs «photo créées et collectées» au nombre de photons incidents. Il ne peut être supérieur à 1 et croît avec l'épaisseur de la zone absorbante. Il est souvent compris entre 0,5 et 0,9 et pour une photodiode idéale il est égal à 1.

- **Le courant d'obscurité** : Le courant d'obscurité est le courant circulant en l'absence de toutes sources lumineuses. Son origine est thermique et il augmente de 10% pour une augmentation de température de 1°C.
- **La sensibilité (S)**: définit le rapport du photo courant I_{ph} au flux énergétique (ou puissance optique P_{opt}) reçu (e) et s'exprime en (A/W).
- **La bande passante**: permet de savoir si le courant peut suivre une variation brusque du Flux de photons, et quel est le facteur de proportionnalité entre le temps de montée ou de descente du photo courant et ceux du flux lumineux [15].

7. Principe de fonctionnement de la photodiode:

La photodiode est un composant à base de matériaux semi-conducteurs dans laquelle seront pénétrés les photons transmis par la fibre. Sa structure lui permet de transférer efficacement l'énergie de photons incidents sur des électrons contenus dans le matériau (absorption du photon) en provoquant son passage d'un état de la bande de valence à un état plus élevé de la bande de conduction. Et donc ces électrons excités sont plus ou moins libres de se déplacer dans la structure pour former un courant électrique.

Le nombre d'électrons est égal au nombre de photons absorbés. Seuls les photons d'énergies supérieures à la largeur de bande (gap) interdite du semi-conducteur sont absorbés de manière utile et créant les paires électrons-trous. Ce gap fixe donc l'énergie minimale pour assurer le fonctionnement de la photodiode.

Cela implique une longueur d'onde de coupure λ_c , au-delà de laquelle le matériau devient transparent au rayonnement. Afin d'empêcher les électrons de retomber dans leur état le plus stable, une différence de potentiel est appliquée, sous laquelle les deux catégories de porteurs sont séparées et entraînées vers des zones où ils sont majoritaires (nommées P ou N). Les porteurs ainsi générés sont alors recueillis sous forme de photo courant [20].

8. Les différents types des photo-détecteurs

Dans cette partie nous présentons brièvement les différents types de photodiodes:

8.1 PN Junction photodiodes:

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. 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 atteint 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 majoritaires dans l'autre côté, participant ainsi à la génération du photo-courant. Ils peuvent se recombiner au cours de leur déplacement [16].

CHAPITRE III: OPTOELECTRONIQUE / PHOTO-DETECTEURS

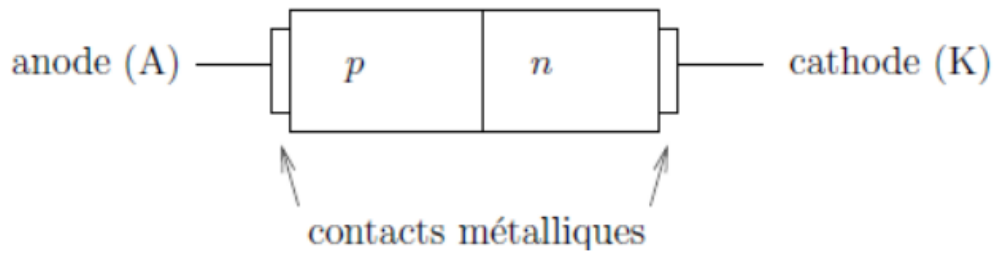


Figure III.3 Schéma de principe d'une diode à jonction pn [20].

Une jonction PN est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte. C'est à dire que la transition de la zone P à la zone N se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse [25].

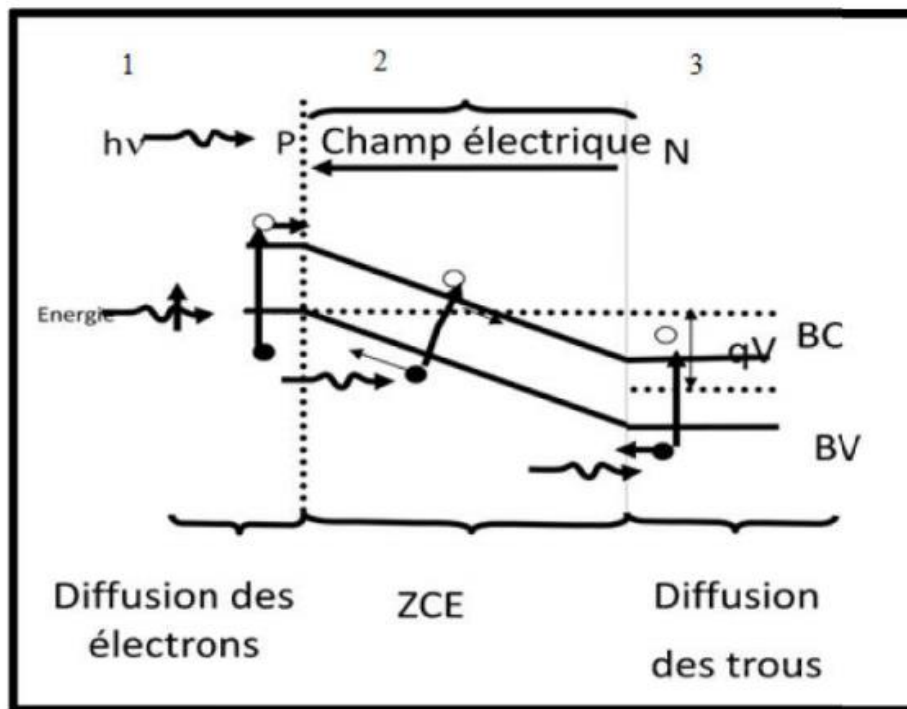


Figure III.4 : Principe de fonctionnement d'une photodiode PN[9].

Il apparaît donc à l'équilibre au voisinage immédiat de la jonction une zone vide de porteurs libres, semblable à un condensateur chargé, du côté N, les donneurs ionisés positivement et du côté P les accepteurs ionisés négativement c'est la ZCE (zone de charge d'espace). La présence des donneurs et accepteurs chargés produit un champ électrique, qui

forme en équilibre, une barrière d'énergie. La largeur de la zone de charge d'espace est une fonction décroissante des niveaux de dopage du matériau. Une paire électron-trou produite dans cette ZCE est donc séparée par l'effet champ électrique interne de la jonction et ne donne pas lieu d'une recombinaison. Ce sont ces Porteurs qui contribuent au photo-courant. La structure de bande de la jonction implique que le photo-courant soit constitué de porteurs minoritaires. Pour cette raison, le photo-courant circule dans le sens inverse de la diode, ou le sens direct est par définition le sens d'écoulement des porteurs majoritaires (de la région N vers la région P et inversement pour les trous)[18].

Principe du fonctionnement:

- Augmenter l'épaisseur de la zone de charge d'espace.
- Intercaler une couche de semi-conducteur intrinsèque.
- Transfert rapide des charges.
- Temps de réponse court.

8.2 Photodiode PIN

La principale qualité d'une photodiode PIN est que la composante d'entraînement du photo-courant domine sur la composante diffusive simplement parce que la plupart de la puissance optique incidente est absorbée à l'intérieur de la zone I. En effet, la zone I est placée entre la zone P et la zone N d'un semi-conducteur différent dont la bande interdite est choisie afin que les photons incidents soient absorbés seulement dans la zone I de la photodiode.

Les photodiodes PIN sont développées à partir des photodiodes de jonction PN. Le fonctionnement de la photodiode PIN est similaire à la photodiode de jonction PN sauf que la photodiode PIN est fabriquée différemment pour améliorer ses performances.

La photodiode PIN est développée pour augmenter le courant de porteur minoritaire et la vitesse de réponse.

Les photodiodes PIN génèrent plus de courant électrique que les photodiodes de jonction PN avec la même quantité d'énergie lumineuse [20,22).

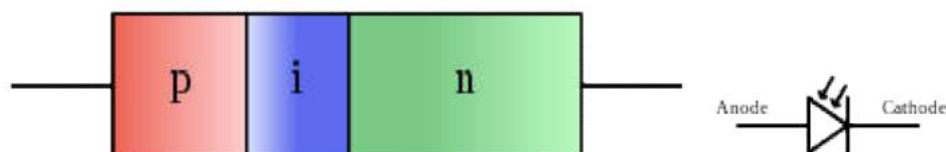


Figure III.5: Symbole de photodiode PIN[23].

❖ Les Couches de photodiode PIN

Une photodiode de jonction PN est constituée de deux couches, à savoir des semi-conducteurs de type p et de type n, tandis que la photodiode PIN est constituée de trois couches, à savoir le type p, le type n et le semi-conducteur intrinsèque.

Dans la photodiode PIN, une couche d'addition appelée semi-conducteur intrinsèque est placée entre le semi-conducteur de type p et le type n pour augmenter le courant de porteurs minoritaires [19].

❖ Principe du fonctionnement PIN :

Une photodiode PIN est constituée d'une région P et d'une région N séparées par une couche intrinsèque hautement résistive. La couche intrinsèque est placée entre la région P et la région N pour augmenter la largeur de la région d'épuisement. Les semi-conducteurs de type P et de type N sont fortement dopés. Par conséquent, la région P et la région N de la photodiode PIN ont un grand nombre de porteurs de charge pour transporter du courant électrique. Cependant, ces porteurs de charge ne transporteront pas de courant électrique sous une condition de polarisation inverse.

D'autre part, le semi-conducteur intrinsèque est un matériau semi-conducteur non dopé. Par conséquent, la région intrinsèque n'a pas de porteurs de charge pour conduire le courant électrique. En condition de polarisation inverse, les porteurs de charge majoritaires dans la région N et la région P s'éloignent de la jonction. En conséquence, la largeur de la région d'épuisement devient très large. Par conséquent, les porteurs majoritaires ne transporteront pas de courant électrique sous une condition de polarisation inverse. Cependant, les transporteurs minoritaires porteront le courant électrique parce qu'ils éprouvent la force répulsive du champ électrique externe.

Dans la photodiode PIN, les porteurs de charge générés dans la région d'épuisement transportent la majeure partie du courant électrique. Les porteurs de charge générés dans la région P ou dans la région N ne portent qu'un faible courant électrique. Lorsque l'énergie lumineuse ou photonique est appliquée à la diode PIN, la majeure partie de l'énergie est observée par la région intrinsèque ou d'épuisement en raison de la largeur d'épuisement [19,22].

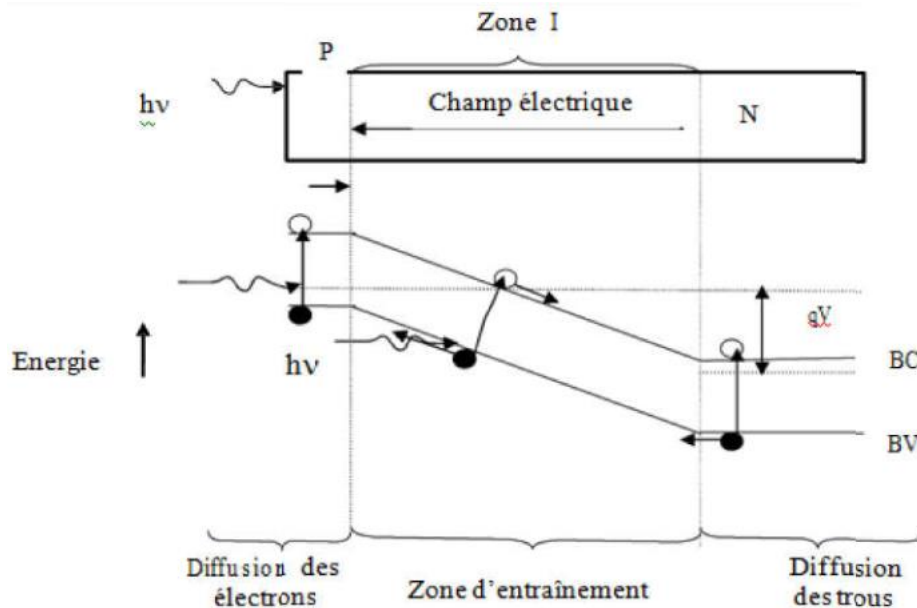


Figure III.6 :Principe de fonctionnement de la jonction PIN[9].

9. Modes de fonctionnement photodiode:

- Une photodiode peut être utilisée dans l'un des deux modes : photovoltaïque ou Photoconducteur.
- La sélection du mode de fonctionnement de la photodiode dépend des exigences de vitesse de l'application et de la quantité de courant sombre qui est tolérable [22].

10. Paramètres de performance d'une photodiode:

▪ Réactivité:

La sensibilité est le rapport entre le photo courant généré et la puissance lumineuse incidente.

▪ Efficacité quantique:

L'efficacité quantique est définie comme le rapport du nombre de paires électrons trou (photoélectrons) généré aux photons incidents.

▪ Temps de réponse:

Le temps de réponse d'une photodiode est défini comme le temps qu'il faut pour que les porteurs de charge générés par la lumière franchissent la jonction p-n [22].

11. Objectifs et limites de la photodiode:

- La photodiode doit toujours être utilisée en situation de polarisation inverse.
- La tension de polarisation inverse appliquée doit être faible.
- Générer un bruit faible.
- Gain élevé.
- Vitesse de réponse élevée.
- Haute sensibilité à la lumière.
- Faible sensibilité à la température.
- À bas prix.
- Petite taille.
- Longue durée de vie.

12. Applications photodiodes:

- La détection rapide des signaux faibles.
- L'asservissement.
- La photométrie.
- Les instruments de mesure.
- La télécommunication par fibre optique.
- L'imagerie médicale Lecteurs de disques compacts.
- Détecteur de fumée.
- Applications spatiales.
- Les communications optiques.
- La mesure des intensités lumineuses extrêmement faibles.

Chapitre IV

Résultats De Simulation Et Interprétations

1. Introduction

Ce dernier chapitre est consacré à la simulation d'une structure de photodiode PIN au silicium en utilisant le logiciel SILVACO Atlas. On effectue celui-ci pour permettre la visualisation 2D et 3D de la structure étudiée et permet aussi de simuler et tracer les différentes caractéristiques d'une photodiode PIN au silicium (caractéristiques I-V et réponse spectrale). Notre étude se focalisera sur l'étude de l'influence des paramètres internes et externes sur les caractéristiques de la photodiode, à savoir ; Le dopage et l'épaisseur de la région intrinsèque, la température et l'éclairage de la photodiode. La simulation numérique présente ainsi les avantages suivants [1]:

- ♣ Elle permet d'éviter la fabrication de plusieurs prototypes de cellules avec des paramètres différents.
- ♣ Elle est indépendante de la technologie utilisée (on peut donc faire varier largement les paramètres).
- ♣ On peut séparer l'influence de chaque zone de la cellule dans le cas de paramètres interdépendants.

2. Caractéristiques et capacités d'ATLAS :

a. Ensemble complet de modèles :

ATLAS fournit un ensemble complet de modèles physiques, notamment :

- DC, CA à faible signal et dépendance à temps plein.
- Modèles de transport par dérive-diffusion.
- Bilan énergétique et modèles de transport hydrodynamique.
- Chauffage en treillis et dissipateurs thermiques.
- Hétérojonctions graduées et abruptes.
- Interactions optoélectroniques avec le traçage général des rayons.
- Matériaux amorphes et poly-cristallins.
- Environnements de circuit généraux.
- Émissions stimulées et rayonnement
- Statistiques Fermi-Dirac et Boltzmann.
- Modèles de mobilité avancés.
- Dopage lourd.
- Dynamique de l'accepteur complet et du piège donneur
- Ohmique, Schottky et contacts isolants.
- SRH, radiative, Auger et recombinaison de surface.
- L'ionisation par impact (locale et non locale).
- Portes flottantes.
- Tunnelisation bande-à-bande et Fowler-Nordheim.
- Injection de porteurs chauds.
- Modèles de transport quantique
- Les courants d'émission thermoïniques [33]

b. Capacités entièrement intégrées :

ATLAS fonctionne bien avec d'autres logiciels de SILVACO. Par exemple, ATLAS.

- Fonctionne dans l'environnement d'exécution interactif DECKBUILD.
- Est interfacé avec TONYPLOT, le module graphique et d'analyse interactif.
- Accepte les données des simulateurs de processus ATHENA et SSUPREM3.
- Est interfacé avec l'extraction de paramètres UTMOST et le logiciel de modélisation d'appareils.

- Peut être utilisé dans des expériences avec les OUTILS D'AUTOMATISATION VWF.

c. Mise en œuvre numérique sophistiquée :

ATLAS utilise de puissantes techniques numériques, notamment :

- Techniques de discrétisation précises et robustes.
- Les stratégies d'itération non linéaire de Gummel, Newton et de Newton.
- Solveurs efficaces, à la fois directs et itératifs, pour les sous-problèmes linéaires.
- Stratégies initiales puissantes.
- Techniques de calcul de petit signal qui converge à toutes les fréquences.
- Intégration de temps stable et précise [34].

3. Différentes étapes de simulation:

Pour effectuer cette simulation sous SILVACO-Atlas, il est nécessaire de bien définir la structure utilisée. On doit spécifier le domaine physique de la simulation pour cela en définissant le maillage, les régions, les électrodes et le niveau de dopage. La simulation d'un dispositif semiconducteur selon ATLAS-SILVACO se fait en suivant les étapes suivantes :

a. Spécification de la Structure étudiée

La spécification de la structure est effectuée en définissant le maillage, les régions, les électrodes et le niveau de dopage.

b. Spécification de Maillage

Le maillage est une série de lignes horizontales et verticales. Dans notre étude, le maillage utilisé est à deux dimensions. Par conséquent, seuls les paramètres x et y sont définis.

c. Spécification des Régions et Matériaux

Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions du maillage. Les limites de chaque région sont explicitement identifiées dans les axes x et y. Notons que le code de couleur indique la matière. Les régions ont des lignes verticales et horizontales pour marquer leurs limites.

d. Spécification des électrodes

ATLAS a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies.

e. Spécification de Dopage

Le dernier aspect de la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage. Le dopage peut être de type N ou P. Le type de distribution peut être uniforme ou gaussien. Après la définition des différentes caractéristiques structurelles telles que le maillage, les dimensions, les électrodes et le dopage. Il reste à préciser les modèles et les contacts.

f. Spécifications des Matériaux et des modèles.

Le matériau peut être déclaré par rapport à son type et à plusieurs autres paramètres comme exemples : la mobilité d'électrons (MUN) et la mobilité de trous (MUP), (TAUN0) et (TAUP0) qui sont les durées de vie d'électrons et de trous respectivement. Les modèles physiques sont classés en cinq catégories : Mobilités des porteurs de charges, mécanismes de génération-recombinaison, les statistiques de transport, l'ionisation par impact et l'effet tunnel. Le choix du modèle dépend des matériaux choisis pour la simulation.

4. Description de la structure simulée

La photodiode PIN est un composant semi-conducteur de l'optoélectronique. Elle est utilisée comme photodétecteur dans de nombreuses applications industrielles. Sa particularité vient de sa jonction composée d'une zone intrinsèque intercalée entre une région fortement dopée P et une autre fortement dopée N. Les photodiodes PIN Silicium possèdent une réponse spectrale entre 400 et 1100 nm.



FigureIV.1 : structure standard d'une photodiode PIN

Notre structure de référence que nous allons étudier (par simulation) qui est représentée dans la figure IV.1 est une photodétecteur PIN. Dans cette étude, nous utilisons une photodiode PIN à base de silicium avec une épaisseur de $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$, dopée uniformément à une concentration en donneurs et accepteurs de $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$.

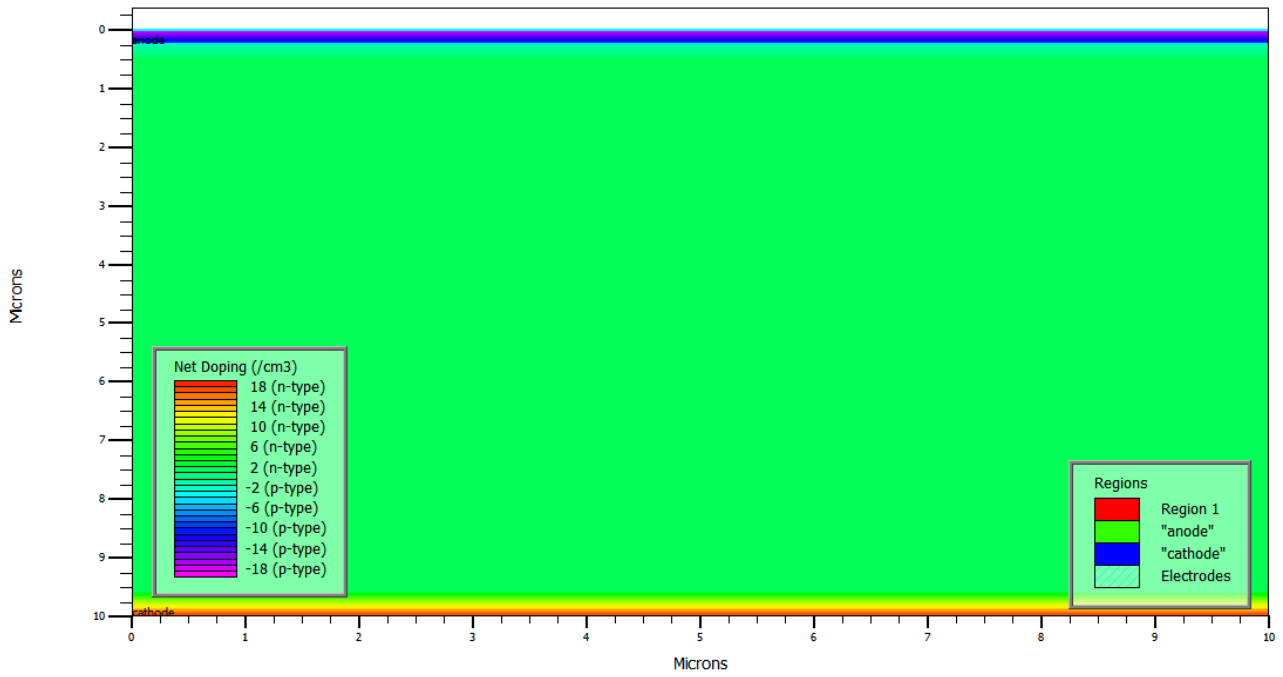


Figure IV.2 : La structure Photodiode PIN en silicium

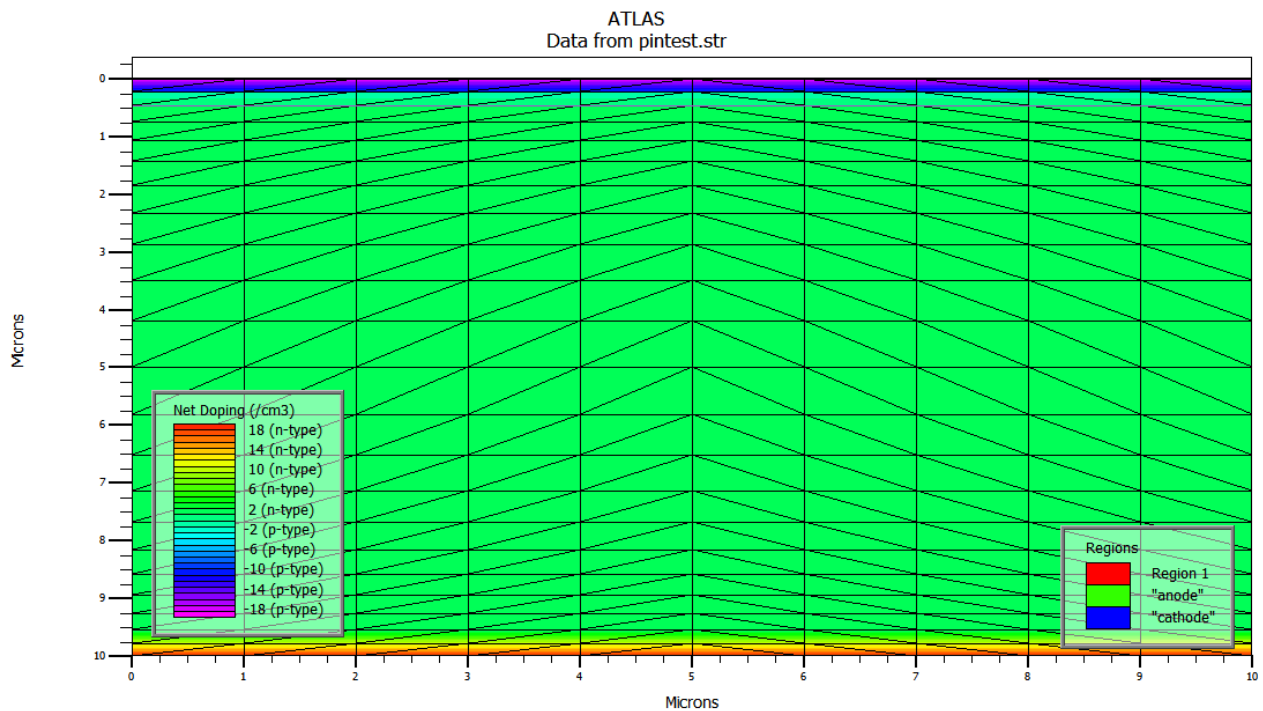


Figure IV.3 : Le maillage de la structure Photodiode PIN en silicium

5. Résultats de la simulation

La caractéristique courant-tension $I(V)$ est une propriété importante de la photodiode. L'étude de la courbe d'évolution du courant (présence d'une phase nul, linéaire ou non linéaire ...) en fonction de la tension permet de mieux comprendre le fonctionnement de la photodiode. Par exemple, le courant en augmentant est le signe que la mobilité des électrons dans le canal à augmenter et plus la tension diminue et plus la mobilité des électrons diminuent.

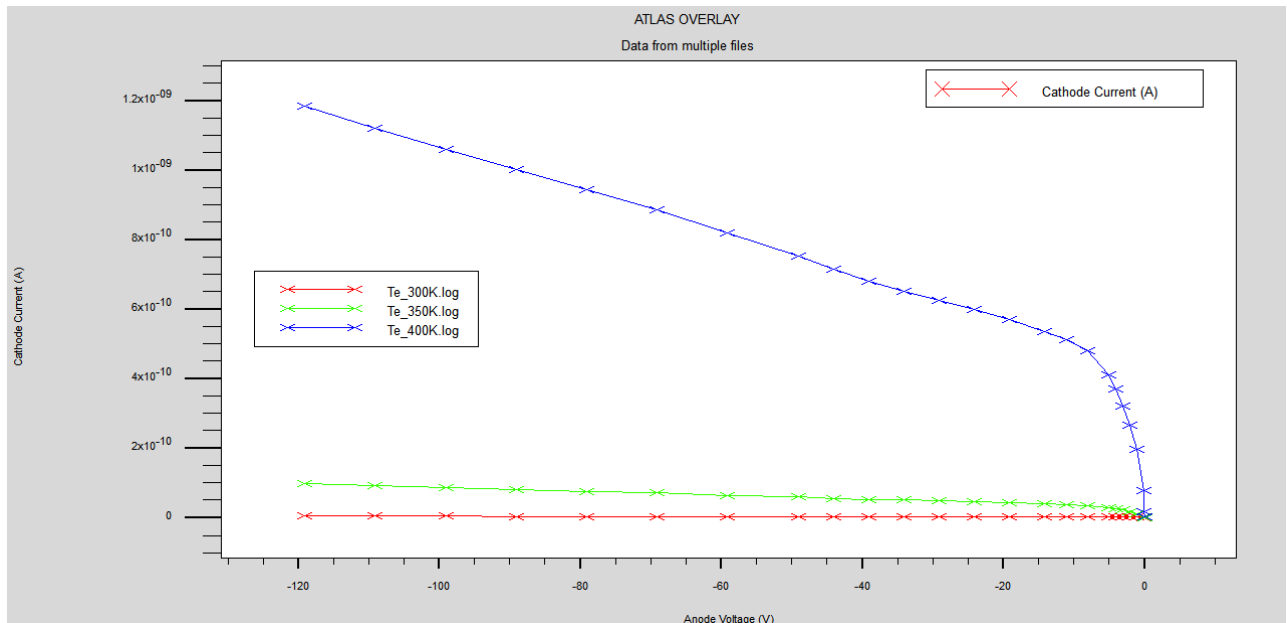
La relation entre le dopage et le courant, est une relation inverse qui existe entre le dopage de la région intrinsèque I et le courant. En effet plus le dopage augmente plus le courant diminue. Cela est dû au rétrécissement de la ZCE et à la structure propre de la photodiode à savoir classique (ce qui limite le nombre de photo-porteur). Cette relation est propre à la structure de la photodiode. Il en existe d'autre tel que l'épaisseur de la zone intrinsèque qui quand sa valeur augmente le photo-courant augmente, et de ce fait, Favorisant l'arrivée des porteurs de charge photo-générés et réduisant le temps de transit entre la région P et la région I, ce qui donne en conséquence l'augmentation du courant.

Pour une meilleure compréhension de la caractéristique nous allons simuler le fonctionnement de la photodiode et voir l'influence de différents paramètres influenceurs externes (Effet de rayonnement incident, Effet de la température, ...) sur la caractéristique courant-tension de la photodiode, pour des tensions inverse allant de -5V à 0.5V (polarisation inverse) avec un pas de 0.05V, dans ce qui suit :

5.1 Effet de la température:

a. Caractéristique courant – tension:

La température est un élément qui influence les composants électronique soit positivement soit négativement, dans la figure IV.4, nous pouvons observer l'influence de la température sur la caractéristique courant-tension de la photodiode.



FigureIV.4 : effet de la température sur la caractéristique I-V

Le résultat de la simulation de l'influence de la température sur la photodiode, nous conduit à conclure que une augmentation de la valeur de la température influence la photodiode et modifier sa caractéristique en augmentant le courant. Cela s'explique par l'influence de la température sur la concentration intrinsèque de la photodiode. Une augmentation de la température est suivie par une augmentation de la concentration ce qui provoque une l'augmentation de la valeur du courant.

b. Réponse spectrale

Afin d'étudier l'effet de la température sur la réponse spectrale de la photodiode, nous avons simulé et calculer avec le logiciel SILVACO, le résultat obtenu est illustré sur la figure IV.5 et figure IV.6.

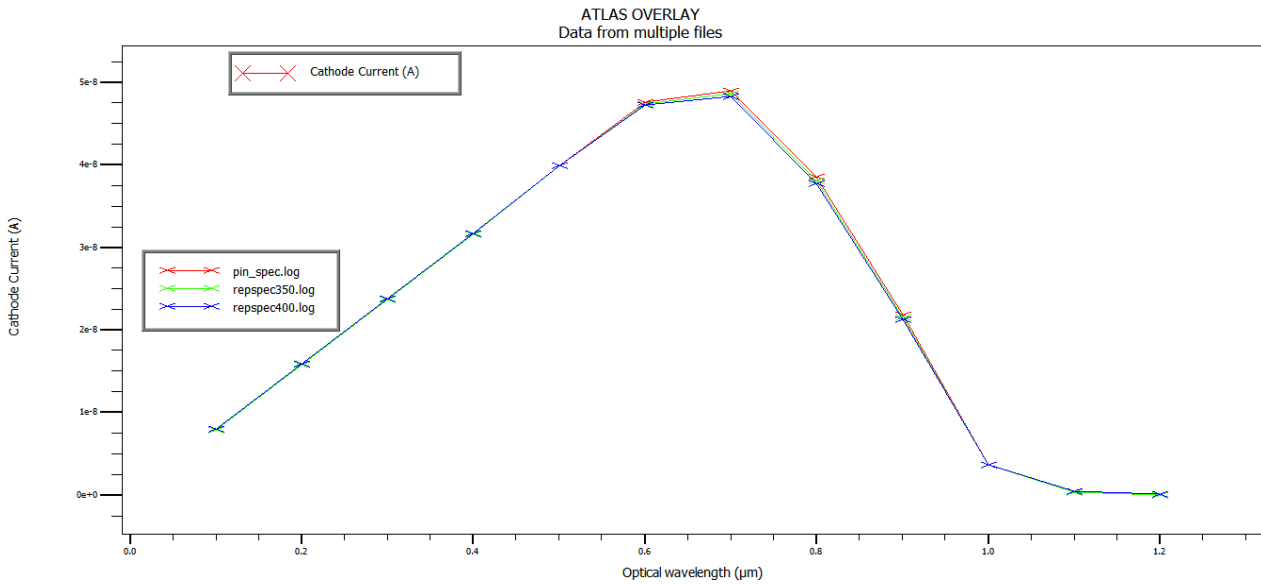


Figure IV.5: Effet de la température sur la réponse spectrale

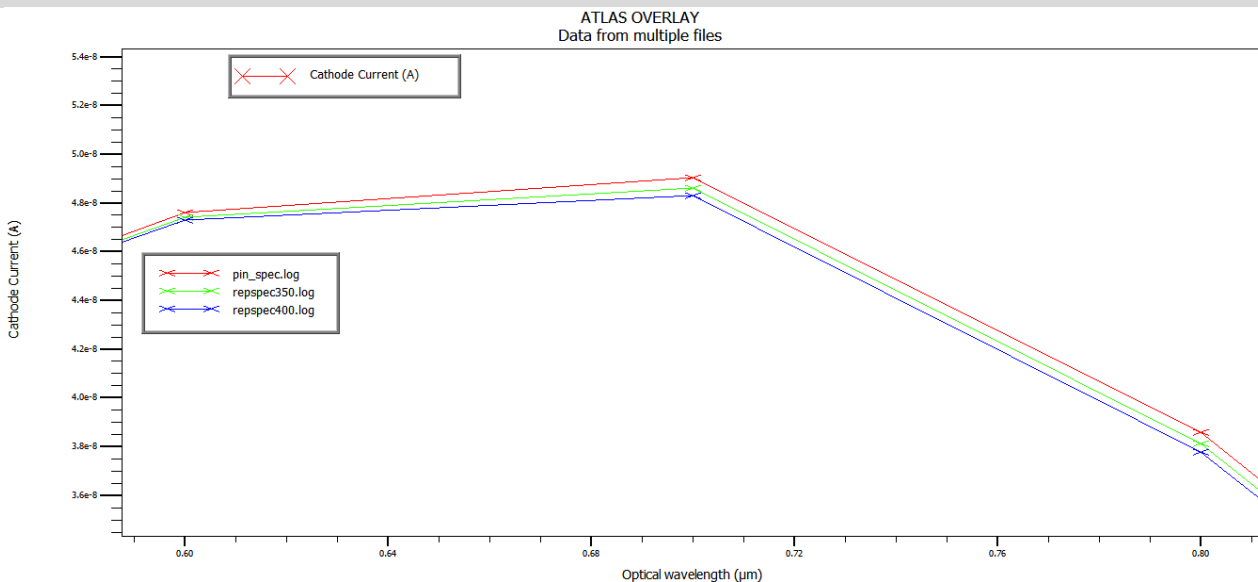


Figure IV.6 :Effet de la température sur la grandissement de la région.

La variation dans les valeurs de la température ne démontre pas une grande influence de la température. Les trois valeurs prise de la température (300°K, 350°K et 400°K) démontrent qu'un changement de température s'accompagne d'une légère déformation de la réponse spectrale. Cela est dû à une caractéristique propre du silicium à savoir une bande d'énergie indirecte. C'est à dire que le phénomène de génération des paires provoque une augmentation de la température interne, supérieure à celle de la température externe ce qui entraine une diminution de l'absorption.

5.2 Effet de rayonnement incident:

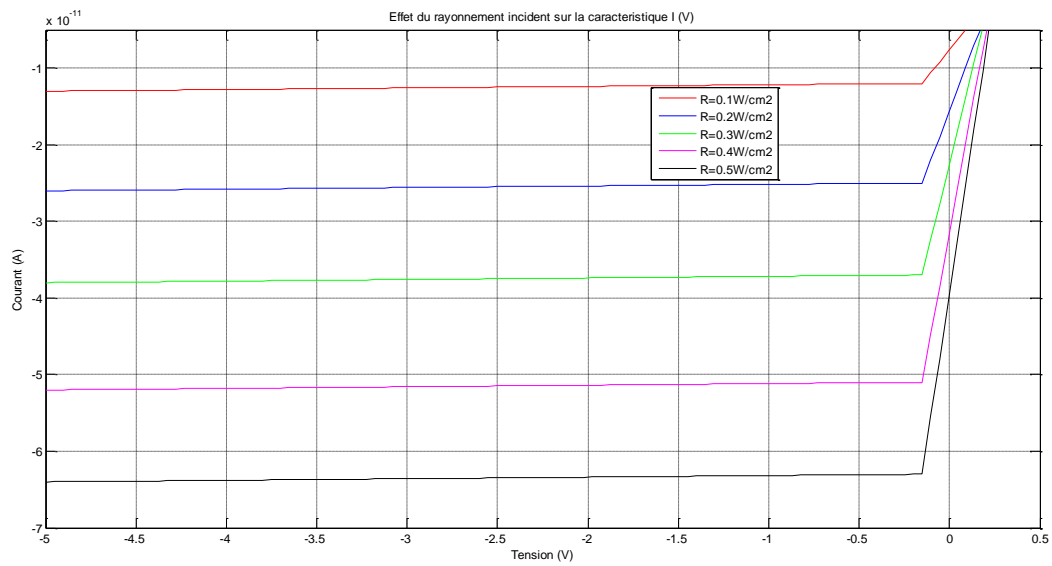


Figure IV.7: Effet du rayonnement incident sur la caractéristique I-V

Sur la figure IV.7 est représenté la simulation sous Silvaco-TCAD de la caractéristique courant-tension (I-V) en fonction du rayonnement incident. Nous observons une augmentation du courant en parallèle avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement incident. Cela est dû à la relation existante entre le nombre de paires électron-trou et la quantité de photons reçu par la structure.

5.3 Effet de la surface éclairée de la photodiode

Figure IV.8 montre l'effet de l'augmentation de la surface éclairée de la photodiode sur la caractéristique courant – tension I(V) de la photodiode.

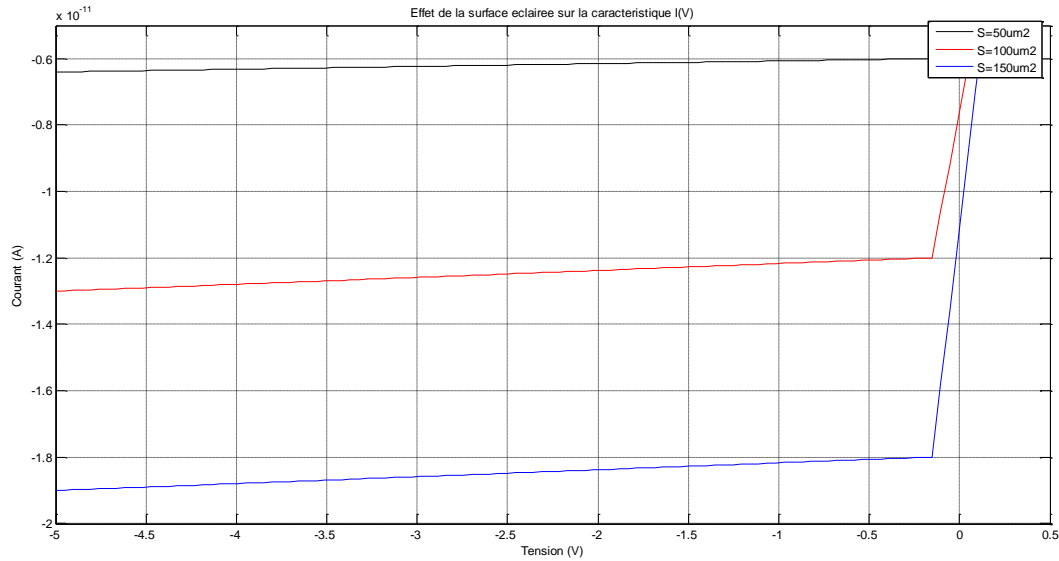


Figure IV.8 : effet de la surface éclairée sur la caractéristique I-V

La figure IV.8 démontre que plus la surface éclairée de la photodiode est grande plus le courant augmente. L'exposition de la photodiode à un rayonnement permet la génération de porteurs de charge, cette augmentation du nombre de porteurs apporte une contribution au courant total, permettant ainsi d'améliorer le rendement du dispositif.

6. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons introduit le principe de l'application de la simulation ATLAS-SILVACO en 2D et de simulation du processus technologique d'Atlas. La première étape de ce chapitre fut de donner un aperçu sur les étapes à suivre pour construire sa structure, ensuite nous avons simulé la structure choisie qui est une photodiode PIN à base de silicium.

Par la suite nous avons étudié l'influence des paramètres physiques externes de la structure proposée la photodiode PIN à base de Silicium, cela nous a permis de voir nettement sur quel paramètre influe chaque étape de simulation, pour obtenir les meilleures performances dans les bonnes conditions de fonctionnement.

Conclusion générale:

Dans ce travail, Nous avons fixé comme but de simuler la caractéristique courant tension (IV) et la réponse spectrale $S(\lambda)$ d'une photodiode PIN à base de silicium en utilisant le logiciel SILVACO-Atlas. Nous avons simulé les effets de l'épaisseur de la région intrinsèque I , du dopage de la région intrinsèque I et de la température. Nous avons simulé également, l'effet de la surface éclairée et de rayonnement incident sur la photodiode PIN Les résultats obtenus sont :

- l'augmentation du rayonnement incident s'accompagne d'une augmentation du courant. En revanche, la réponse spectrale ne varie pas.
- l'augmentation de la surface éclairée de la photodiode s'accompagne d'une augmentation du courant, et augmentation de la réponse spectrale pour les longueurs d'onde de 100 à 1000 nm où le maximum passe de 0.5 à 0.75 A /W. Contrairement pour les longueurs d'onde supérieure à 1000 nm où la sensibilité spectrale ne change pas.
- l'augmentation de la température entraîne une diminution du courant, et d'une légère diminution de la réponse spectrale.
- Diminution de l'épaisseur de la région I s'accompagne d'une diminution du courant, et une diminution de la réponse spectrale dans l'intervalle de longueurs d'ondes 100 à 750 nm.
- L'augmentation du dopage de la région intrinsèque I , s'accompagne d'une diminution du courant, et une légère diminution de la réponse spectrale pour les longueurs d'onde 600 à 900 nm. Contrairement pour les longueurs d'onde supérieure à 900 nm et les longueurs d'ondes inférieure à 600 nm où la sensibilité spectrale ne change pas. Nous souhaitons que les futur(e)s étudiant(e)s étudient l'effet de d'autres paramètres sur les propriétés électriques et optiques de d'autres dispositifs optoélectroniques.

BIBLIOGRAPHIES:

Reference chapitre I:

[10] R. Mahamdi, L.Saci, F. Mansour, P. Temple-Boyer, E. Scheid and L. Jalabert. "Physicochemical characterization of annealed polySi/NIDOS/SiO₂ structures". Spectroscopy Letters.Vol. 42, N°3. (2009), pp.167 170.

[20] E. H. Nicollian and J. R. Brews, MOS (Metal Oxide Semiconductor), Physics and Technology, editions J.Wiley, pp.784 785,1982.

[1] C.F. Chen and C.Y. Wu, "A Characterization model for ramp-voltage-stressed I-V characteristics of thin thermal oxides grown on silicon substrate", Solid-State Electronics, Vol. 29, pp. 1059 1068, 1986.

[2] Y. Maneglia, "Analyse en profondeur des défauts de l'interface Si/SiO₂ par la technique du pompage de charges", thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1998.

[22] S.M. SZE «Physics of semiconductor devices", J. Wiley & Sons, p. 365, 1981.

[25] D K. Schrodera, "semiconducteur material and device characterization", Third Edition, Arizona State University Tempe, AZ, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION

[1] D. Ziane, "Influence de contraintes électriques bidirectionnelles appliquées aux structures MOS", thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne Ardenne, 2000.

BIBLIOGRAPHIES

- [19] H. Kufluoglu, "MOSFET degradation due to negative bias temperature instability (NBTI) and hot carrier injection (HCL) and its implications for reliability aware VLSI design, Purdue University, West Lafayette, Indiana Doctor of Philosophy 2008.
- [23] S.M. SZE, Kwok K. Ng "Physics of Semiconductor Devices". 3^{emes} Edition, Wiley Interscience (2007).
- [15] Ramdane Mahamdi, Farida Mansour, Emmanuel Scheid, Pierre Temple -Boyer and Laurant Jalabert. "Boron Diffusion and Activation During Heat Treatment in Heavily Doped Polysilicon Thin Films for P+ Metal-Oxide-Semiconductor Transistors Gates". Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 40, (2001), pp. 6723-6727.
- [3] E. Vincent, "Etude des propriétés de dégradation du système Si/SiO₂ – Application à la fiabilité des filières CMOS submicroniques", thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1996.
- [24] "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", Henry Mathieu, édition Masson, Paris, p293, 1998.
- [14] Farida Mansour, Ramdane Mahamdi, Laurant Jalabert, Pierre TEMPLE -Boyer. "Boron diffusion into nitrogen doped silicon films for P+ polysilicon gate structures". Thin Solid Films 434 (2003), pp.152-156.
- [20] E. H. Nicollian and J. R. Brews, MOS (Metal Oxide Semiconductor), Physics and Technology, editions J.Wiley, pp.784-785, 19
- [23] S.M. SZE, Kwok K. Ng "Physics of Semiconductor Devices". 3^{emes} Edition, Wiley Interscience (2007).
- [7] E. Harari, "Dielectric breakdown in electrically stressed thin films of thermal SiO₂", Journal of Applied Physics, Vol. 49, pp. 2478-2489, 1978.
- [8] A. Vapaille et R. CASTAGNE, "Dispositifs et circuits intégrés semiconducteurs", édition Dunod, Paris, 1990.
- [1] C.F. Chen and C.Y. Wu, "A Characterization model for ramp-voltage-stressed I-characteristics of thin thermal oxides grown on silicon substrate", Solid-State Electronics, Vol. 29, pp. 1059-1068, 1986.

BIBLIOGRAPHIES

[25] D K. Schrodera, "semiconductor material and device characterization", Third Edition, Arizona State University Tempe, AZ, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION

[9] S.M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", Wiley-Interscience, 2nd edition, New York, 1981.

Reference chapitre II:

[29] D. M. Fleetwood, P. S. Winokur, R. A. Reber, T. L. Meisenheimer, J. R. Schwank, M. R. Shaneyfelt, and L. C. Riewe, "Effects of oxide traps, interface traps, and border traps on metal oxide-semiconductor devices", J. Appl. Phys., vol. 73, pp. 5058-5074, 1993.

[5] R.H. Fowler, L. Nordheim, "Electron emission in intense electric field", Proc. R. Soc. London, Ser. A 119, pp. 173-181, 1928.

[25] D K. Schrodera, "semiconductor material and device characterization", Third Edition, Arizona State University Tempe, AZ, A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION

[34] B. Balland, "Defects in silica films: their nature — their electrical properties, tire de Instabilities in Silicon Devices", G. Barbottin and A. Vapaille, Eds. Elsevier Science Publishers Amsterdam, vol. 1, pp. 101-153, 1986.

[35] D. Bauza, "Handbook of Surface and Interfaces of Materials, Surface and Interface Phenomena"; Edited Hari Singh Nalwa, M. SC., PH. D Stanford Scientific Corporation Los Angeles, California, USA Academic Press, Vol. 1, 2001.

[38] M.J. Uren, V. Nayar, K.M. Brunson, C.J. Anthony, J.H. Stathis, E. Cartie, "Interface state capture cross section measurements on vacuum annealed and radiation damaged Si:SiO₂ surfaces"; Electrochem. Soc., vol 145(2), pp. 683-689, 1998.

[6] E. Ciantar, "Mise au point d'une méthode de suivi de la qualité et de la fiabilité des oxydes minces en milieu industriel", thèse de Doctorat, Université de Montpellier, 1995.

[2] Y. Maneglia, "Analyse en profondeur des défauts de l'interface Si/SiO₂ par la technique du pompage de charges", thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1998.

[1] D. Ziane, "Influence de contraintes électriques bidirectionnelles appliquées aux structures MOS", thèse de Doctorat, Université de Reims Champagne- Ardenne, 2000.

BIBLIOGRAPHIES

- [21] S.M.SZE "Semiconductor device and technology", John Wiley & Sons. 1985
- [22] S.M. SZE «Physics of semiconductor devices", J. Wiley & Sons, p. 365, 1981.
- [23] S.M. SZE, Kwok K. Ng "Physics of Semiconductor Devices". 3^{èmes} Edition, Wiley Interscience (2007).
- [39] F.Sai gne, " Une nouvelle approche de la sélection des composants de type MOS pour l'environnement radiatif spatial" , Thèse de doctorat, 1998.
- [40] J.R.Schwank, P.S.Winokur, P.J.McWhorter, F.W.Sexton, P.V.Dress end or ferand D.C.Turpinet, "Physical Mechanisms contributing to device“rebound”, IEEE. Trans. Nucl .Sci. ,vol.31,pp.1434-1438,1984.
- [26] P.V. Gray and D.M. Browns, "Density of SiO₂/si interface states", Appl. Phys. Lett. 8, 31 (1966).
- [31] N.M.Johnson,D.K.Biegelsen, M.D.M oyer, S.T.Chang E.H.Poindexter and P.J.Caplan. ,"Characteristic electronic defects at the Si-SiO₂ interface", Appl.Phys.Lett. ,vol.43,pp.563-565,1983.
- [32] A.Stesmans,B. Nouwenand V.V.Afnas'ev,"Pb1 interface defect in thermal 100.Si/SiO₂:Si hyperfine interaction", Physi calReviewB,vol.58,pp.15801-15809,1998.
- [30] S. Iacovo and A. Stesmans, "Multi-frequency electron spin resonance study of inherent Si dangling bond defects at the thermal (211) Si/SiO₂ interface", physica status solidi (c), Special Issue: E-MRS 2014 Spring Meeting – Symposium X, Volume 11, Issue 11-12, pages 1589–1592, 2014.
- [33] A.StesmansandV.V.Afnas 'ev," Electrical activity of interface ial par a magnetic defect sin thermal(100)Si/SiO₂",PhysicalReviewB,vol.57,pp.10030 -100347,1998.
- [3] P. M. Lenahan, "Book chapter on Pb and E prime Centers. in a CRC handbook" (Taylor-Francis publishers) on defects in semiconductor devices,2008
- [28] D. Landheer, G. H. Yousefi and J. B. Weeb, «Deep-level transient spectroscopy of HF cleaned and sulfupassivated InP metal/nitrid/semiconductor", J. Appl. Phys. vol. 75, pp. 3516 3521;1994

BIBLIOGRAPHIES

[20] E. H. Nicollian and J. R. Brews, MOS (Metal Oxide Semiconductor), Physics and Technology, editions J.Wiley, pp.784-785,1982.

Reference chapitre III :

[19]:Benzeghdasabah.‘‘Etuded’unphotodetecteurPINenGermaniumetenalliageSiGepourobtentirlediplômédemagisterenélectronique, universitédeConstantine.

[16] : Ghania HARZALLAH «Etude et modélisation d’un photodétecteur MSM à base de ZnO,UNIV» CONSTANTINE.

[17] : Thomas Chalopin. «Montage et caractérisation d’un photodétecteurpour une détection hétérodyne optique. Formation Interuniversitaire de Physique - ENS.Pierre-François Cohadon et Leonhard Neuhaus»Stage de L3. Juillet 2014.

[22] :<http://www.j3ea.org/articles/j3ea/pdf/2003/01/j3ea2003007.pdf>

[23] : <http://www.abcelectronique.com/divers/dossiers/photodetecteurs>

[26] :E. Cassan* ∝ (IEF, Université Paris-SudOrsay).pdf

[24] : ELOTREUCH Refka et BOUGHAR Souad «Etude et Optimisation d’une Photodiode dans une Chaîne de Transmission par Fibre Optique » Université de KHEMIS MILIANA 2017.

[14] :Moussaoui Islam,Rahmoune Abderrahmene,Etude par simulation des propriétés électriques des composants HEMTs à base d’hétérostructure ALGaAs/GaAs,Mémoire du master,Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana,2015.

[20] : MEDJDOUB Fadila«Optimisation par la simulation système d’une chaîne de transmission numérique par fibre optique haut débit»UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN. 2010

[15] : MEDJDOUB-Fadila ‘’, optimisation par la simulation système d’une chaîne de transmission numérique par fibre optique haut débit’’, mémoire de magister, université ABOU BAKR BELKAID – TLEMCEN ,2010

[22] :<http://www.physics-and-radio-electronics.com/electronic-devices-andcircuits/semiconductor-diodes/photodiodesymboltypes.htm>.