

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة محمد بوضياف - المسيلة

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

قسم الإلكترونيك

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

## MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : ELECTRONIQUE

OPTION : INSTRUMENTATION ET MAINTENANCE INDUSTRIEL

### THEME

**Etude de comportement de la capacité d'une diode  
polycristalline latérale**

*Proposé et dirigé par:*

*Mr. BAKHTI Haddi*

*Mr. BENTOUMI Miloud*

*Réalisé par :*

*ROUAG Ilyas*

**N° D'ordre:**

**PROMOTION: JUIN 2016**

---

## REMERCIEMENTS

*Nos sincères remerciements s'adressent à Allah le grand merci lui revient, pour son aide et la volonté qu'il nous a donné pour surmonter tous les obstacles et les difficultés durant nos années d'études et de nous avoir éclairé notre chemin afin de réaliser ce modeste travail.*

Je tiens à remercier Mr. Haddi .Bakhti, et Mr. Miloud. Bentoumi, pour avoir accepté de diriger ce mémoire, pour les conseils qu'il m'a prodigué et pour les efforts qu'il a consenti tout au long de la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous mes Enseignants.

Je remercie également les membres de jury d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

Je remercie un remerciement spécial pour le Mr.AHMED

Je remercie chaleureusement ma famille, pour leur soutien inconditionnel tout au long de mes longues années d'études.

Finalement, je tiens à adresser notre très sincère remerciement à tous ceux qui m'aidé à accomplir ce travail.

Ilyas rouag

---

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mon père.*

*A ma mère.*

*A ma famille.*

*A mes frères et sœurs.*

*Ainsi que tous mes amis et  
proches.*

*ilyas rouag*

---

---

## Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I Diode à jonction</b>	
Introduction.....	5
I.1 Les semi-conducteurs.....	6
I.1.1 Les semi-conducteurs purs ou intrinsèques.....	7
I.1.2 Les semi-conducteurs dopés ou extrinsèques .....	8
I.1.2.1 Dopage des semi-conducteurs.....	8
I.2 Différents types de dopage.....	8
I.2.1 Semi-conducteur dopé N.....	8
I.2.2 Semi-conducteur dopé P.....	10
I.3 La jonction PN.....	11
I.3.1 Définition des jonctions PN (abrupte et graduelle).....	11
I.3.1.1 Jonction PN abrupte.....	12
I.3.1.2 Jonction graduelle .....	12
I.4 Capacité $C(V)$ d'une jonction PN .....	12
I.5 Jonction PN non polarisée .....	13
I.6 Polarisation directe.....	16
I.7 Polarisation inverse.....	17
I.8 Effet de la température.....	18
I.9 Caractéristiques électriques .....	19
I.9.1 Caractéristique courant / tension .....	19
I.9.2 Résistance différentielle ou dynamique.....	20
I.10 Schéma équivalent .....	21
I.10.1 Diode idéale .....	21
I.10.2 Diode avec seuil.....	21
I.10.3 Diode avec seuil et résistance .....	21
Conclusion .....	22
<b>Chapitre II Diode latérale polycristalline</b>	
Introduction.....	24
II.1 Structure cristalline.....	24
II.2 Description physique du silicium poly-cristallin.....	25

---

II.2.1 Le silicium monocristallin .....	25
II.2.2 Le silicium amorphe .....	26
II.2.3 Le silicium poly-cristallin.....	28
II.3 Propriétés structurales du silicium poly-cristallin .....	29
II.3.1 Structure d'un film de silicium poly-cristallin .....	29
II.3.2 Effet de la température sur la taille des grains.....	31
II.4 Propriétés électriques du silicium poly-cristallin .....	33
II.4.1 Effet du dopage sur les caractéristiques électriques .....	33
II.4.3 Influence de la température de dépôt sur la résistivité du silicium poly-cristallin.....	34
II.5 Obtention des films minces de Si poly-cristallin par la technique LPCVD .....	35
II.5.1 Four de dépôt LPCVD .....	35
II.5.2 Avantage et inconvénient du dépôt LPCVD .....	36
II.6 Modélisation de la conduction électrique dans des couches de silicium poly-cristallin .....	37
II.6.1 Modèle de ségrégation des dopants .....	37
II.6.2 Modèle de piégeage des porteurs.....	37
Conclusion .....	40

### **Chapitre III Simulation des étapes technologiques des diodes réalisées sur le silicium polycristallinne**

Introduction.....	42
III.1 Conception par simulation (TCAD-SILVACO) du jonction PN latérale .....	42
III .1.1 Présentation du logiciel TCAD-SILVACO.....	42
III.1.2 DECKBUILD.....	42
III.1.3 ATHENA .....	43
III.1.4 DEVEDIT.....	43
III.1.5 ATLAS.....	44
III.1.6 TONYPLOT.....	44
III.1.7 Logique de programmation .....	46
III.2 Spécification de la Structure du cas traité .....	49
III.2.1 Le Maillage .....	49
III.2.2 La structure du dispositif.....	49
III.2.3 Les paramètres des matériaux .....	49
III.2.4 Les modèles physiques pour une diode.....	49
III.2.5 Les méthodes numériques .....	50
III.2.6 Comparaison des méthodes.....	50

---

---

III.2.7 La solution.....	51
III.3 La structure de la diode latérale du cas envisagé .....	51
III.3.1 Maillage du dispositif.....	51
III.3.2 Choix du substrat.....	52
III.3.3 Dépôt de la couche polycristalline .....	53
III.3.4 Implantation ionique de Bore avec recuit.....	53
III.3.5 Formation de l'oxyde .....	54
III.3.6 Ouverture d'une fenêtre dans l'oxyde. ....	54
III.3.7 Implantation ionique de phosphore avec recuit.....	55
III.3.8 Métallisation.....	56
III.3.9 Paramètres technologiques et géométriques du composant fini.....	56
Conclusion .....	57

## **Chapitre IV Simulation et caractérisation de la diode polycristalline Latérale**

Introduction .....	59
IV.1 Les étapes de programmation.....	59
IV.1.1 Spécification de la structure.....	60
IV.2.2 Spécification des matériaux et des modèles.....	60
IV.2.3 Sélection des méthodes numériques.....	63
IV.2.4 Spécification de Solution.....	63
IV.2.5 Analyse des résultats.....	64
IV.3 Simulation des caractéristiques électriques de la diode latérale .....	64
IV.3.1 Caractéristique capacité-tension inverse .....	64
IV.4 Caractérisation et analyse des résultats de la diode étudiée.....	67
1) La largeur de la zone charge d'espace ZCE (W) .....	67
2) La ZCE aux joint de grain <i>WGB</i> .....	68
3) La tension de diffusion <i>V<sub>d</sub></i> .....	68
4) Densité de pièges .....	69
5) La hauteur de barrières aux joint de grain .....	69
Conclusion.....	70
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>72</b>
<b>Références bibliographie .....</b>	<b>74</b>

---

---

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I.01. Schéma de principe d'une diode 'a jonction PN.....	5
Figure I.02. Symbole électrique d'une diode et les sens conventionnels adoptés pour le courant I et la tension V.....	5
Figure I.03. Structure en Bandes d'énergie pour les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs.....	6
Figure I.04. (a) Atome de Silicium (b) Cristal de Silicium.....	7
Figure I.05. Silicium dopé au phosphore (a) à $T = 0 \text{ }^\circ\text{K}$ et, (b) à $T = 0 \text{ }^\circ\text{K}$ .....	9
figure I.06. La représentation simplifiée d'un semi-conducteur type N.....	9
Figure I.07. Silicium dopé au Bore (a) à $T = 0 \text{ K}$ et, à (b) $T = 0 \text{ K}$ .....	10
figure I.08. La représentation simplifiée d'un semi-conducteur type P. ....	10
Figure I.09. Niveau d'énergie (a) pour un dopage de type N, et (b) pour un dopage de type P.....	11
Figure I.10. Jonction P-N.....	11
Figure I.11 Jonction métallurgique (PN).....	11
Figure I.12. Evolution de la différence (Nd– Na). a) abrupte et b) graduelle.....	12
Figure I.13. Jonction PN à l'équilibre thermodynamique.....	14
Figure I.14. Equilibre au niveau de la jonction.....	15
Figure I.15. jonction PN polarisée en direct.....	17
Figure I.16. jonction PN polarisée en inverse.....	17
Figure I.17. Effets de la température.....	19
Figure I.18. Caractéristique courant / tension.....	20
Figure I.19. Résistance dynamique.....	20
figure I.20. Diode idéale (néglige la tension de seuil et la résistance interne).....	21
figure I.21. Diode avec seuil.....	21
Figure I.22. Diode avec seuil et résistance.....	21

### Chapitre II

Figure II.01. Structure cristalline du diamant.....	25
Figure II.02. Maille cubique conventionnelle de la structure diamant.....	26
Figure II.03. Bandes d'énergie dans le silicium.....	26
Figure II.04. Liaisons pendantes.....	27

---

Figure II.05. Densité d'états en échelle logarithmique dans la bande interdite du silicium amorphe( $E_V$ : bande de valence, $E_C$ : bande de conduction).....	27
Figure II.06. Joints de grains (Vue MEB : Microscopie électronique à balayage).....	29
Figure II.07 Structure granulaire (a) et colonnaire (b) du poly-silicium.....	30
Figure II.08. Joint de grain, zone déserte et zone de confinement des porteurs dans un matériau poly-cristallin.....	31
Figure II.9. Taille moyenne des grains en fonction de la température de dépôt de silicium poly-cristallin (Epaisseur du dépôt 0.5 $\mu\text{m}$ ).....	32
Figure II.10. Taille moyenne des grains en fonction de l'épaisseur de la couche de silicium poly-cristallin (Température de dépôt : 620°C ; Température de recuit : 900°C). ....	32
Figure II. 11. Taille moyenne des grains en fonction de la température de recuit (Recuit : 30 min dans $\text{N}_2$ sec). ....	32
Figure II.12. Résistivité du silicium poly et monocristallin en fonction du niveau de dopage. ....	34
Figure II.13. Résistivité du silicium poly-cristallin en fonction de la température de dépôt.....	35
Figure II.14. Diagramme schématique du four de dépôt LPCVD.....	36
Figure II.15. illustration du modèle de Seto pour le silicium poly-cristallin de type N. ....	39

### Chapitre III

Figure III.1. L'outil Deckbuild. ....	43
Figure III.2. Exemple de simulation en 2D de l'étape d'oxydation sous ATHENA.....	45
Figure III.3. Présentation schématique montrant la participation des outils de SILAVACO lors de la simulation.....	45
Figure III.4. Maillage du dispositif. ....	52
Figure III.5. le substrat utilisé. ....	52
Figure III.6 . Dépôt de la couche polycristalline.....	53
Figure III.7. Implantation ionique de Bore.....	53
Figure III.8. Oxydation humide. ....	54
Figure III.9. Ouverture d'une fenêtre.....	54
Figure III.10. Implantation ionique de phosphore.....	55
Figure III.11. Profil de dopage après l'étape de redistribution durant le.....	55
Figure III.12. Formation des contacts métalliques.....	56
Figure III.13. Structure finale du composante simulée sous .....	57

### Chapitre IV

FigureIV.1. Maillage à deux dimensions(x,y).....	60
Figure IV.2. Définition des régions.....	61

---

Figure IV.3. Dépotes électrodes.....	61
Figure IV.4. Type de dopage. ....	62
Figure IV.5. Caractéristique capacité-tension pour une fréquence $f = 5\text{KHz}$ .....	64
Figure IV.6. Caractéristique capacité-tension pour une fréquence $f = 10\text{KHz}$ .....	65
Figure IV.7. Caractéristique capacité-tension pour une fréquence $f=30\text{KHz}$ . ....	65
Figure IV.8. Caractéristique capacité-tension pour des différentes fréquences.....	66
Figure IV.9. Variation de la densité de charge de la jonction graduelle.....	67
Figure IV.10. Barrière de potentiel aux joints de grains du polysilicium.....	69

## Liste des tableaux

### Chapitre III

Tableau III.1. Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas (les commandes fondamentales afférentes). ....	47
Tableau III.2. Grandeurs optimales de la structure. ....	57

### Chapitre IV

Tableau IV.1. Groupes de commandes. ....	59
------------------------------------------	----

---

## Liste des symboles

- e** : Charge de l'électron =  $- 1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}^\circ$ .
- K** : Constante de Boltzmann =  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ .
- T** : Température absolue, en  $^\circ\text{K}$ .
- V<sub>0</sub>** : Barrière de potentiel.
- I<sub>S</sub>** : Courant de saturation.
- I<sub>i</sub>** : Courant inverse .
- V<sub>C</sub>** : Tension de claquage.
- I<sub>M</sub>** : Courant de diffusion.
- N<sub>D</sub>** : Concentration des donneurs.
- N<sub>A</sub>** : Concentration des accepteurs.
- n<sub>i</sub>** : Concentration intrinsèque.
- V<sub>D</sub>** : Tension directe.
- h** : Constante de Planck.
- ε** : Permittivité du semi-conducteur.
- Φ** : Barrière de potentiel (eV) .
- E<sub>INT</sub>** : Champ électrique interne.
- m<sub>de</sub>** : Masses effectives d'un électron.
- m<sub>dh</sub>** : Masses effectives d'un trou.
- ...** : Résistivité des semi-conducteurs.
- m<sub>0</sub>** : Masse de l'électron.

***Introduction***

***Générale***

## **Introduction générale**

Les jonctions P-N réalisées sur du silicium polycristallin trouvent actuellement dans le domaine de recherche un développement remarquable, vue leur grand intérêt (vaste applications, faible coût, ...).

Malgré sa contribution surprenante et évolutionnaire qu'il a présentée pour la technologie et surtout ses différentes applications, le silicium polycristallin à garder sa place dans le domaine de la recherche en vue d'améliorer en permanence les performances électriques des composants à semi-conducteur.

Ces composants peuvent jouer un rôle important dans les domaines de l'électronique et de la micro-électronique. Ils peuvent être utilisés en tant que diodes dans les circuits intégrés grâce d'une part à leur possibilité de remplacer les fortes résistances et d'autre part à la faible taille de leurs jonctions latérales qui leur permet d'avoir de faibles capacités parasites.

Actuellement, on les trouve fréquemment dans les dispositifs de grandes surfaces réalisés sur des substrats isolants tels que des verres. Leur étude approfondie permet alors de comprendre le comportement électrique d'autres composants contenant des jonctions, tels que les transistors à effet de champ en couches minces fonctionnant en régime d'inversion et qui comportent une jonction PN entre le contact de drain ou de source et la zone de couche active non inversée. De plus, l'analyse des caractéristiques de ces diodes permet d'éclaircir certaines propriétés du matériau dans lequel elles sont réalisées, notamment en donnant des informations sur les paramètres qui le caractérise, telles que la taille des grains, la densité des pièges inter granulaires et la position des états d'énergie correspondants dans la bande interdite du matériau.

Les jonctions PN au silicium polycristallin ont été étudiées pour la première fois par J. Manoliu et coll. Leur étude a été faite sur des couches minces de silicium polycristallin déposées par décomposition de silane à haute température. Ils ont mis en évidence les fortes recombinaisons et générations dans la zone de charge d'espace de la jonction et l'importante diffusion du dopant à travers les joints de grain du matériau au voisinage de la jonction.

Le problème a été repris par Dutoit et coll. en 1978 qui ont analysé en fonction du dopage et de la température les propriétés des jonctions PN latérales dopées par implantation ionique. Ils ont remarqué que les pièges de joints de grain activent les processus de

recombinaison et de génération, augmentant donc le courant de la diode, et que la jonction est mieux décrite par le modèle de la jonction linéaire graduelle.

En 1982, De Graff et coll. invoquèrent l'effet du champ électrique dans la zone de charge d'espace sur l'émission des porteurs par les pièges pour expliquer le fort courant observé quand ce type de diode est polarisée en inverse.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'effet capacitif d'une diode latérale et voir le comportement de la caractéristique  $C(V)$  (sous polarisation inverse) des jonctions PN polycristallines. L'exploitation exhaustive des relations théoriques pour une jonction graduelle nous a permis de caractériser la diode polycristalline. On donne une importance majeure pour quelques paramètres très utiles pour connaître des informations sur les grains et les joints de grain. Ainsi nous avons pris en charge quelques caractéristiques électriques de la diode latérale. Pour cela nous avons opté un environnement de simulation approprié SILVACO pour la simulation des étapes technologiques de cette diode polycristalline, tenant compte au préalable des paramètres qui la caractérise, puis donner les modèles physiques adéquats qui peuvent donner la capacité de la jonction PN latérale au silicium polycristallin à des différentes fréquences, sous le même environnement.

Nous nous sommes intéressés aux diodes à jonction PN latérales que nous avons réalisées dans des couches minces de silicium polycristallin déposées par le procédé L.P.C.V.D (Low pressure chemical vapor diposition) sur des substrats de silicium monocristallin oxydés.

Dans ce travail, le procédé de fabrication de jonctions PN latérales adapté aux couches minces de silicium polycristallin le plus approprié est la déposition par la méthode L.P.C.V.D sur des substrats de silicium oxydé. Ces diodes polycristallines vont être caractérisées électriquement en fonction de la fréquence.

Ce manuscrit est structuré en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons d'une manière générale l'étude théorique de la jonction PN classique, les modèles de jonction abrupte, de jonction linéaire graduelle et les propriétés physiques et électriques des couches de silicium polycristallin.

Le deuxième chapitre est dédié à la description du procédé technologique suivi par des figures explicatifs, montrant les étapes de fabrication de ces dispositifs dans une couche mince de silicium polycristallin.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter le simulateur TCAD-SILVACO, son principe de fonctionnement, ces équations de bases, les modèles physiques utilisés dans cette simulation, ainsi ces outils de simulation (ATHENA et ATLAS) avec la plateforme de programmation (DECKBUILD) et l'outil de visualisation (TONYPLOT). Ensuite, nous ferons une description des différentes étapes génériques de la fabrication technologique (oxydation, diffusion, gravure,.....) du dispositif simulé sous ATHENA. Enfin, nous donnerons une synthèse sur les différents paramètres géométriques technologiques utilisés dans cette simulation. ( étapes technologiques des diodes réalisées sur le silicium polycristallin).

Le quatrième chapitre, résume les résultats de simulation de la capacité-tension pour des différentes fréquences et le calcul des paramètres ayant une relation avec les grains et les joints de grain permettent de comprendre le comportement du composant à base du silicium polycristallin. L'analyse des résultats expérimentaux de silicium polycristallin nous permettent d'identifier les phénomènes de conduction électrique mis en jeu lorsque la jonction est sous polarisation.

Pour en finir, une conclusion générale couronne ce travail par récapitulation de nos résultats, analyses, remarques et suggestions.

# Chapitre I

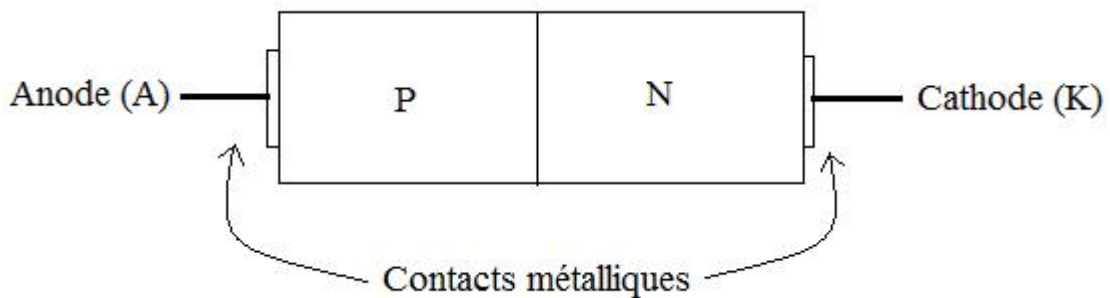
*Diode à jonction*

## Introduction

Une diode est un dipôle passif non linéaire, polarisé dont le fonctionnement macroscopique est assimilable à celui d'un interrupteur commandé qui ne laisse passer le courant que dans un seul sens.

La diode à jonction PN est obtenue en dopant un monocristal semi-conducteur, sur une première moitié avec des accepteurs (région p), et sur l'autre moitié avec des donneurs (région n).

La frontière entre les régions dopées est appelée jonction métallurgique. Des contacts métalliques sont déposés sur le semi-conducteur pour constituer l'anode (contact avec la région p) et la cathode (contact avec la région n). Le schéma de principe de la diode PN est illustré à la figure I.01. La figure I.02 montre le symbole électrique et les sens conventionnels adoptés pour le courant  $I$  et la tension  $V$  d'une diode.



**Figure I.01.** Schéma de principe d'une diode à jonction PN.



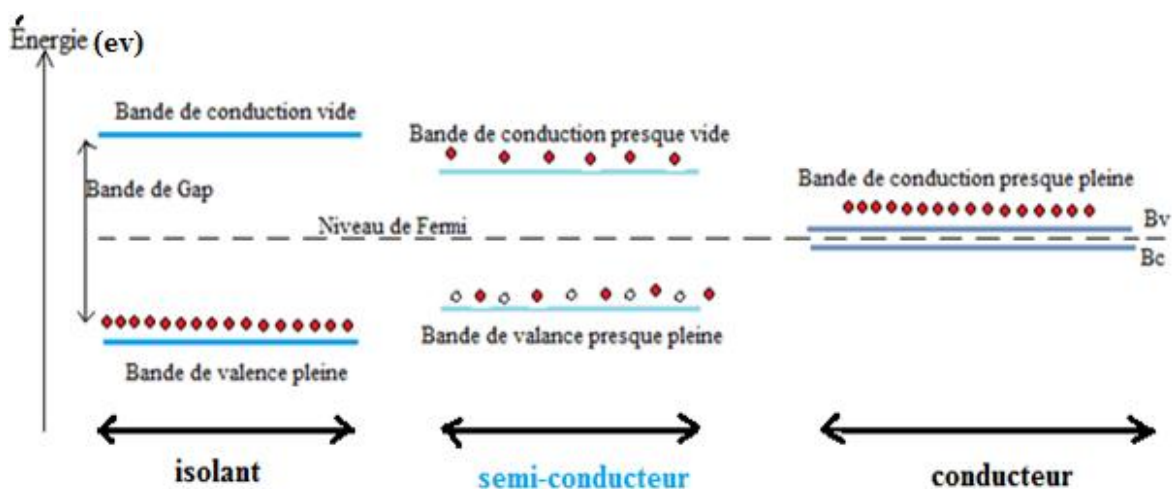
**Figure I.02.** Symbole électrique d'une diode et les sens conventionnels adoptés pour le courant  $I$  et la tension  $V$ .

## I.1 Les semi-conducteurs

Cette classe de matériaux se situe entre les métaux (conducteurs) et les isolants (non conducteurs). La résistivité  $\rho$  des semi-conducteurs varie de  $10^{-3}$  à  $10^{+4}\Omega.cm$ . Les électrons libres et les trous mobiles sont les porteurs de charges responsables de la conductivité électrique. Un semi-conducteur peut être soit intrinsèque (pur) ou extrinsèque (dopé) par des impuretés[1].

- Semi-conducteur intrinsèque : la résistivité du silicium pur est de l'ordre de  $\rho \approx 10^3 \Omega.cm$ .
- Semi-conducteur extrinsèque : la résistivité du silicium dopé par le Bore ou le phosphore est de l'ordre de  $10^{-2} \Omega.cm$ .

Le dopage du silicium permet d'atteindre le taux d'un atome de Bore (B) ou de phosphore (P) pour  $10^5$  atomes de silicium[1]. Pour un isolant la zone interdite (énergie de gap) est large par contre pour un conducteur les deux bandes se chevauchent, et on trouve pour les semi conducteurs l'énergie de gap se situe entre les isolants et les semi conducteurs.



**Figure I.03.** Structure en Bandes d'énergie pour les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs.

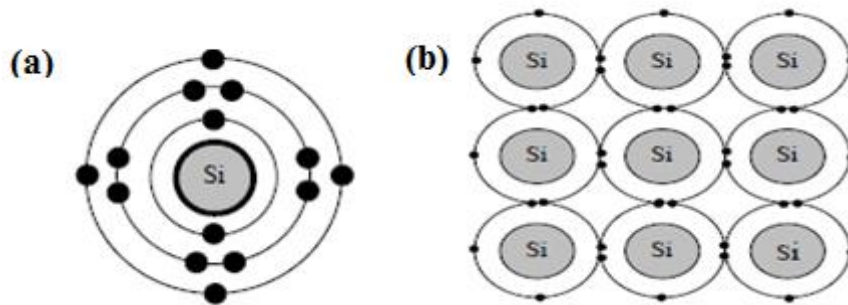
**I.1.1 Les semi-conducteurs purs ou intrinsèques**

Un semi-conducteur dit intrinsèque est un matériau idéal ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique [2]. Le monocristal du silicium possède une structure de type tétraédrique c'est à dire que chaque atome est entouré symétriquement de 4 atomes[3].

Lorsque le corps est parfaitement pur, il est qualifié d'intrinsèque.

Exemples : Silicium (Si), Germanium (Ge), Sélénium (Se)

Le Silicium est un atome tétravalent : Il possède 4 électrons de valence qui vont se mettre en commun avec d'autres atomes de Silicium pour avoir la forme cristalline (Figure I.04).



**Figure I.04.** (a) Atome de Silicium (b) Cristal de Silicium.

On qualifie le silicium d'intrinsèque lorsqu'il ne présente pas d'impuretés dopantes. Un tel silicium est en pratique impossible à obtenir. Dans un silicium intrinsèque, il existe autant de trous que d'électrons libres susceptibles de participer à la conduction, mais leur densité  $n_i$  est très faible à température ambiante si bien que la résistivité ( ) théorique du matériau est de  $3.2 \times 10^5 \text{ } \cdot \text{cm}$ . La densité  $n_i$  s'exprime en fonction de densités d'états effectives de la bande de conduction ( $N_C$ ) et de la bande de valence ( $N_V$ ) ainsi que l'énergie de bande interdite  $E_g$  (1.12eV à 300 °K dans le Silicium)[3]:

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp \left( - \frac{E_g}{2KT} \right) \dots \dots \dots (I.1)$$

$N_C$  et  $N_V$  sont fonction de T et s'expriment :

$$N_C = 2 \times \frac{2 m_{de} KT}{h^2} \dots \dots \dots (I.2)$$

$$N_C = 5,4 \times 10^{15} \times T^3 \text{ } 2\text{cm}^{-3} \dots \dots \dots (I.3)$$

$$N_V = 2 \times \frac{2 m_{dh} KT}{h^2} \dots \dots \dots (I.4)$$

$$N_V = 3,5 \times 10^{15} \times T^3 \text{ } 2\text{cm}^{-3} \dots \dots \dots (I.5)$$

Dans ces expressions,  $h$  est la constante de Planck ( $6,63 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ).  $m_{de}$  et  $m_{dh}$  sont les masses effectives d'un électron et d'un trou utilisées pour les calculs de densité d'état.  $m_{de}$  et  $m_{dh}$  valent respectivement  $1.08m_0$  et  $0.81m_0$ , où  $m_0$  est la masse de l'électron ( $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ )[4].

## I.1.2 Les semi-conducteurs dopés ou extrinsèques

### I.1.2.1 Dopage des semi-conducteurs

Le dopage est l'introduction dans un semi-conducteur intrinsèque de très faible quantité d'un corps étranger appelé dopeur. Pour les semi-conducteurs usuels (Si, Ge), les dopeurs utilisés sont :

- soit des éléments pentavalents: ayant 5 électrons périphériques.  
Exemples : l'Arsenic (As), l'Antimoine (Sb), le Phosphore (P),...
- soit des éléments trivalents: ayant 3 électrons périphériques.  
Exemples : le Bore (B), le Gallium (Ga), l'Indium (In),...

Après le dopage, le semi-conducteur n'est plus intrinsèque mais extrinsèque.

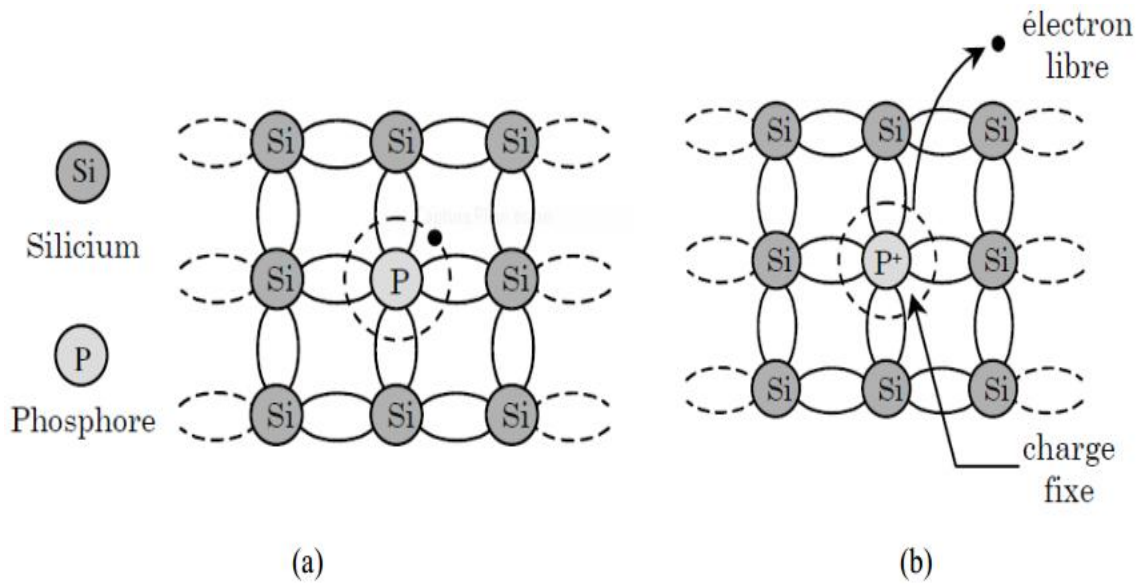
## I.2 Différents types de dopage

Les semi-conducteurs intrinsèques n'ont pas une grande utilité en tant que tels ; ils servent de base aux semi-conducteurs dopés : on y rajoute des impuretés pour modifier leur comportement. Il existe deux types de semi conducteurs extrinsèques[2]:

### I.2.1 Semi-conducteur dopé N

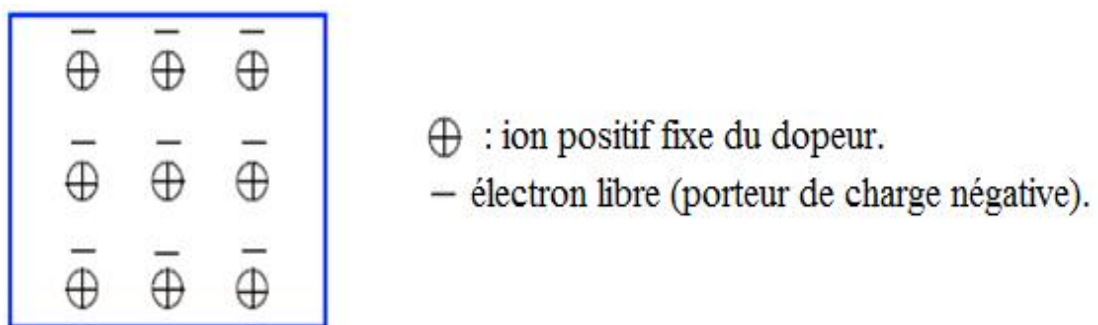
Un semi-conducteur de type N est un semi-conducteur intrinsèque, dans lequel on introduit des impuretés qui possèdent 5 électrons sur leur couche externe (Phosphore ou Arsenic...). Les impuretés sont appelées des donneurs parce qu'elles donnent un électron à la bande de conduction.

La Figure I.05 présente schématiquement des liaisons électroniques pour le silicium dopé avec du phosphore.



**Figure I.05.** Silicium dopé au phosphore (a) à  $T = 0 \text{ °K}$  et, (b) à  $T = 0 \text{ °K}$ .

Quatre électrons d’atome de silicium voisins sont mis en commun avec quatre électrons de l’atome donneur. Le cinquième électron est faiblement lié à l’impureté. Une très faible énergie due à une température supérieure au zéro Kelvin est suffisante pour le libérer et le déplacer dans la bande de conduction pour qu’il se trouve libre [5-7]. L’atome de phosphore a perdu sa neutralité et est devenu un ion positif (charge fixe). Ainsi, il y a apparition d’un niveau d’énergie dans la bande interdite  $E_D$ , situé au-dessous de la bande de conduction (Figure I.09(a)). À température ambiante, la quasi-totalité des atomes donneurs est ionisée. Si  $N_D$  correspond à la concentration des atomes donneurs, on obtient  $n = N_D$  électrons libres. Dans un semi-conducteur de type N, les électrons sont majoritaires, les trous sont minoritaires, et la conduction est assurée par les électrons .



**figure I.06.** La représentation simplifiée d’un semi-conducteur type N.

### I.2.2 Semi-conducteur dopé P

Un semi-conducteur de type P est un semi-conducteur intrinsèque, dans lequel on introduit des impuretés, qui possèdent trois électrons sur leur couche externe (Bore,

Indium ,...). Ces impuretés sont appelées des accepteurs parce qu'elles acceptent un électron de la bande de conduction afin de réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur. La Figure I.07 présente schématiquement des liaisons électroniques pour le semi-conducteur silicium dopé P par du Bore. L'atome dopant a perdu sa neutralité et est devenu alors un ion fixe négatif par capture d'un électron. Ce phénomène correspond à l'apparition d'un niveau d'énergie  $E_A$  dans la bande de gap, au-dessus de la bande de valence. La quasi-totalité des atomes accepteurs est ionisée à la température ambiante (Figure I.09(b)). Si  $N_A$  correspond à la concentration des atomes accepteurs, donc on obtient  $p = N_A$  trous libres. Dans un semi-conducteur de type P, les trous sont les majoritaires, les électrons sont les minoritaires, et la conduction est assurée par les trous[2].

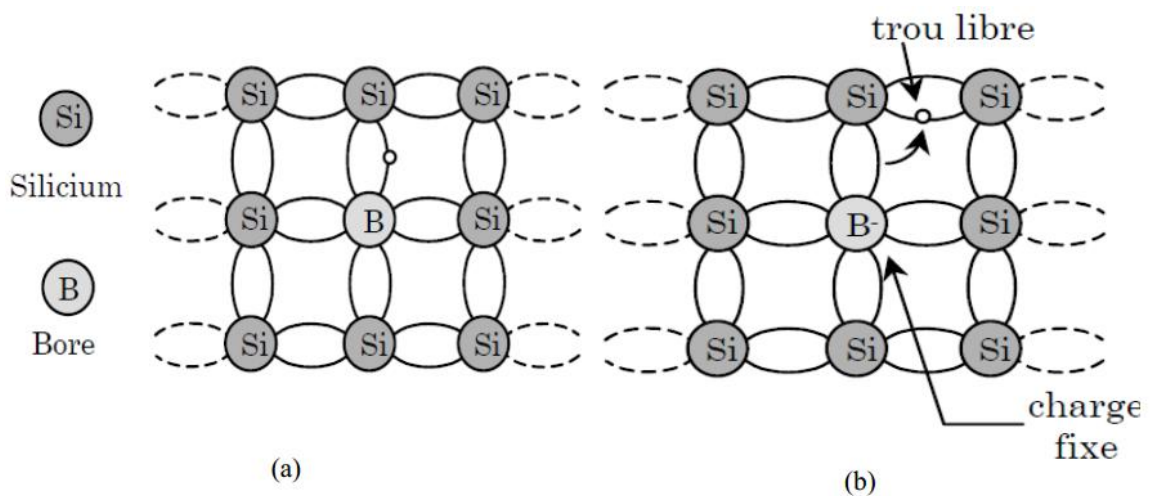


Figure I.07. Silicium dopé au Bore (a) à  $T = 0$  K et, à (b)  $T > 0$  K.

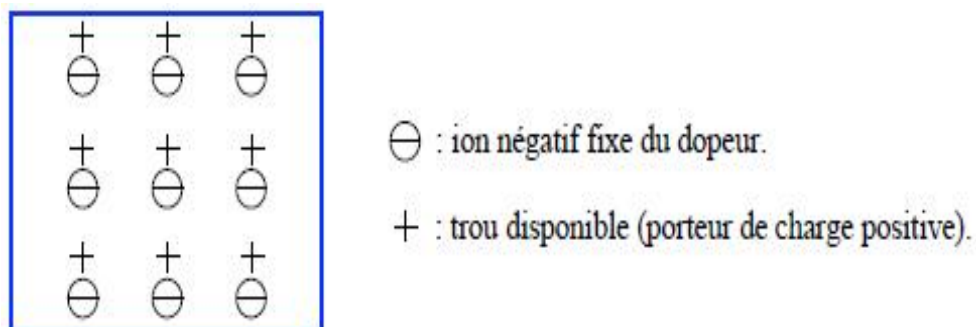
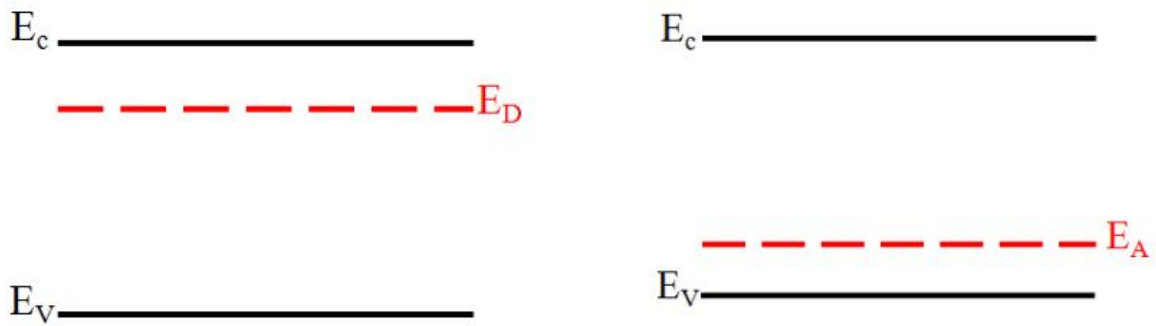


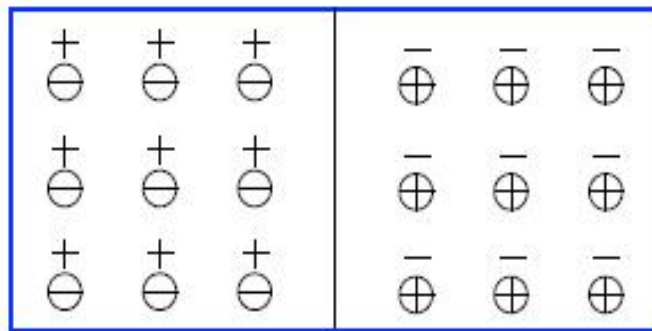
figure I.08. La représentation simplifiée d'un semi-conducteur type P.



**Figure I.09** Niveau d'énergie (a) pour un dopage de type N, et (b) pour un dopage de type P.

### I.3 La jonction PN

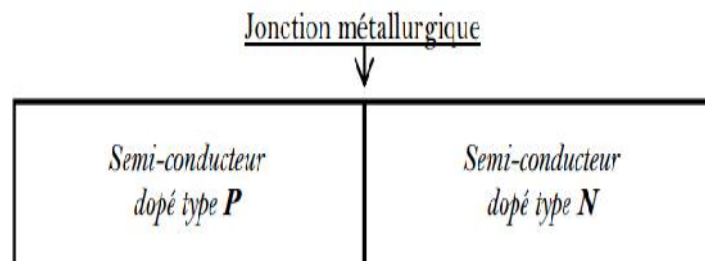
Une jonction P-N est créée en juxtaposant un semi-conducteur de type N (les électrons sont majoritaires) et un Semi-conducteur de type P (les trous sont majoritaires).



**Figure I.10.** Jonction P-N.

#### I.3.1 Définition des jonctions PN (abrupte et graduelle)

Une jonction PN est formée par la juxtaposition d'un semi-conducteur dopé type P (appelé anode) et d'un semi-conducteur dopé type N (appelé cathode), tous les deux d'un même monocristal semi-conducteurs, (figure I.11). Lorsque ces deux types de semi-conducteurs sont mis en contact, un régime électrique transitoire s'établit de part et d'autre de la jonction, suivi d'un régime permanent. Une jonction simple forme une diode[1].



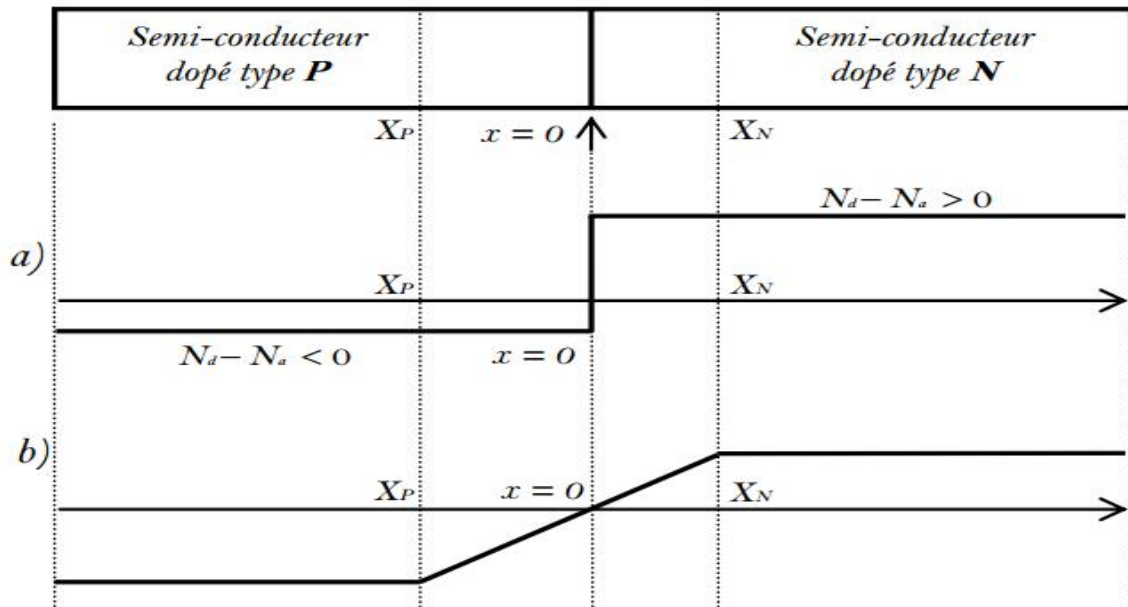
**Figure I.11** Jonction métallurgique (PN).

**I.3.1.1 Jonction PN abrupte**

Dans une jonction abrupte, la concentration en impuretés varie brutalement de la région dopée type P à la région dopée type N. C'est-à-dire, la différence  $(N_d - N_a)$  passe d'une manière brutale à  $x = 0$  d'une valeur négative dans la région dopée type P à une valeur positive dans la région dopée type N, voir figure I.12(a).

**I.3.1.2 Jonction graduelle**

Dans une jonction graduelle, la concentration en impuretés est une fonction dépendante de  $x$  autour de la région de contacte. C'est-à-dire, la différence  $(N_d - N_a)$  dépend de  $x$  entre  $X_p$  et  $X_n$ , voir figure I.12(b), cas d'une dépendance linéaire.



**Figure I.12.** Evolution de la différence  $(N_d - N_a)$ . a) abrupte et b) graduelle.

Remarques :

Le contact entre le semi-conducteur de type P et le semi-conducteur de type N doit être réalisé au sens métallurgique du terme, il n'est pas un simple contacte physique.

**I.4 Capacité C(V) d'une jonction PN**

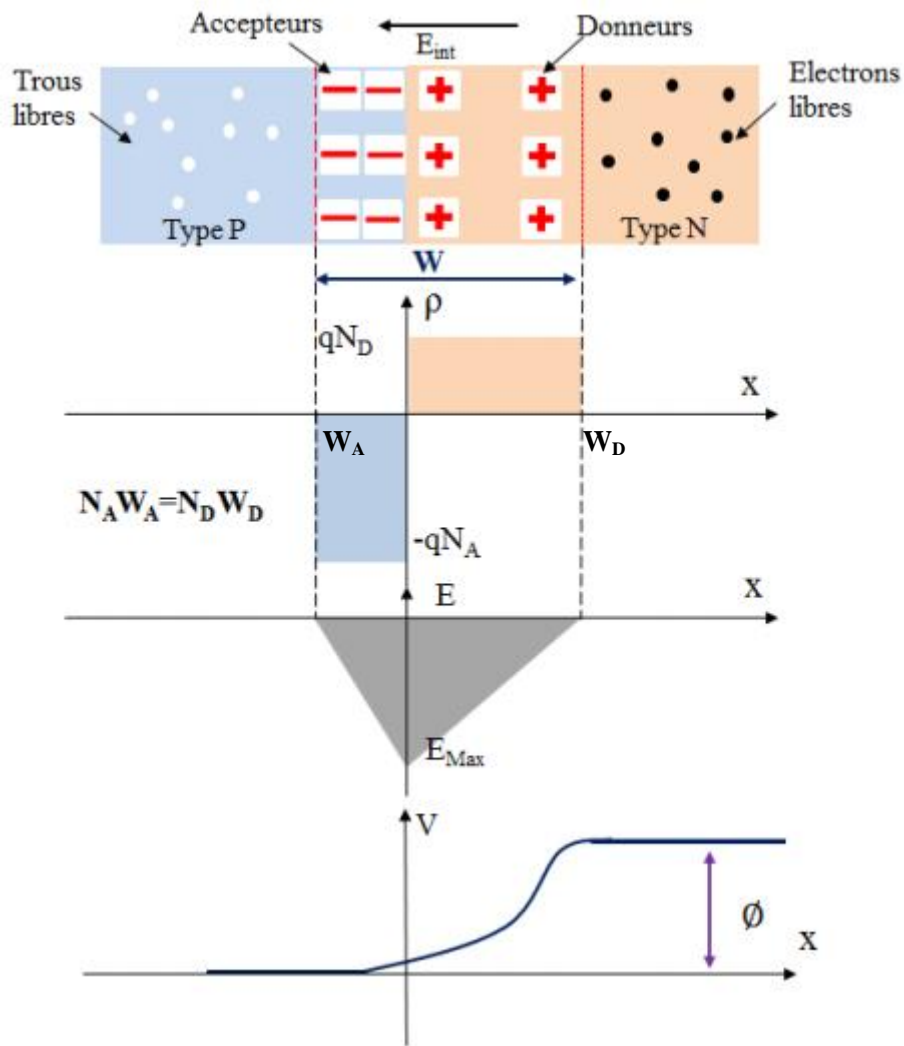
La zone de charge d'espace d'une jonction peut être assimilée à un condensateur d'épaisseur  $W$  dont les armatures sont les deux limites de  $W$  et dont la surface est approximativement l'aire  $A_j$  de la jonction. La capacité de ce condensateur est [8]:

$$\frac{C}{A_j} = \frac{\epsilon_0}{W} \dots \dots \dots (I. 6)$$

Dans un matériau de structure interne uniforme, la capacité varie dans le cas idéal en fonction inverse de  $W$ . Mais, en réalité, un matériau peut toujours contenir des défauts chargés qui créent des zones de charge d'espace isolées. Suivant leur situation par rapport à la jonction, ces défauts peuvent modifier la variation de  $W$ . En effet, une telle zone de charge d'espace située assez près de la jonction peut être atteinte par  $W$  lors de l'augmentation de la polarisation inverse. Cela provoque alors une extension brutale de  $W$  et, par conséquent, une variation brutale de la capacité.

### I.5 Jonction PN non polarisée

À une température ambiante, les deux régions P et N possèdent des concentrations de porteurs différentes. Ceci va entraîner une circulation de courant de diffusion afin d'égaliser la concentration en porteurs des deux régions. En conséquence, les trous qui sont majoritaires dans la région P, vont être diffusés dans la région N laissant derrière eux des ions fixes négatifs. Par contre, les électrons qui restent majoritaires dans la région N, vont être diffusés dans la région P laissant derrière eux des ions fixes positifs [9]. Il apparaît donc au niveau de la jonction PN une zone dépourvue de charges libres et contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique  $E$  interne dirigé de la région N vers la région P. Ce champ s'oppose à la diffusion des porteurs libres dans le but d'atteindre un équilibre électrique. Dans ces conditions, les répartitions du champ électrique, du potentiel électrostatique, et des charges sont résumés sur la Figure I.10. La zone dépourvue de porteurs libres est appelée zone de charge d'espace (ZCE). Elle s'étend sur une épaisseur de l'ordre de  $0,5 \mu\text{m}$  à l'équilibre .



**Figure I.13.** Jonction PN à l'équilibre thermodynamique.

D'après la Figure I.13, la forme du champ électrique peut être déduite par application des équations de l'électrostatique. En effet,  $E(x)$  est un champ qui s'exprime en fonction de la densité de charge interne  $\rho(x)$  :

$$\frac{d E(x)}{dx} = \frac{1}{\epsilon} \rho(x) \dots \dots \dots (I. 7)$$

Où  $\epsilon$  représente la permittivité du semi-conducteur. Il apparaît donc une différence de potentiel résultante du champ électrique entre les deux extrémités de la jonction, appelée potentiel de diffusion. L'expression de ce potentiel est donnée par l'équation suivante :

$$V(x) = - \int E(x) dx \dots \dots \dots (I. 8)$$

La largeur de la zone de déplétion  $W$  est donnée par l'équation suivante :

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon \cdot N_A \cdot N_D}{q \cdot N_A \cdot N_D}} \phi \dots \dots \dots (I. 9)$$

Avec  $N_A$  et  $N_D$  représentant respectivement les concentrations des atomes accepteurs et des atomes donneurs.  $\phi$  représente la barrière de potentiel qui constitue le potentiel de diffusion de la jonction, et s'écrit sous la forme suivante :

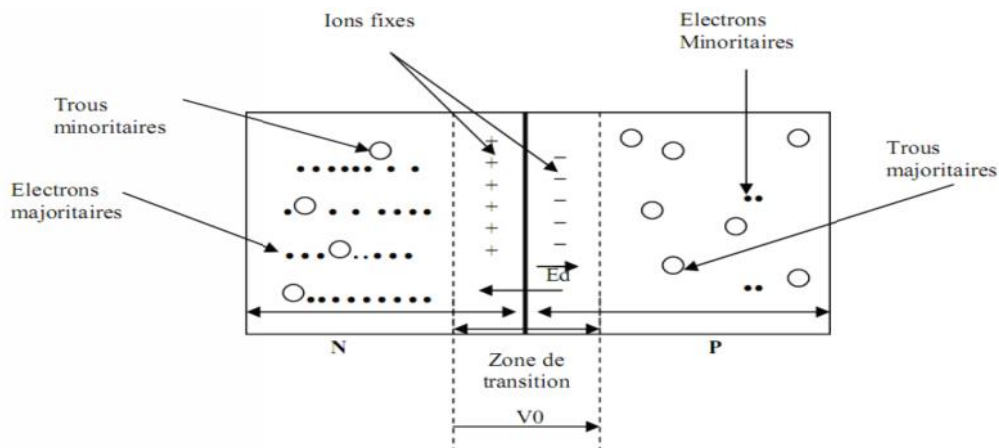
$$\phi = U_T \cdot \ln \left( \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right) \dots \dots \dots (I. 10)$$

$$U_T = \frac{K \cdot T}{q} \dots \dots \dots (I. 11)$$

Avec  $n_i$  est la concentration intrinsèque des porteurs libres,  $q$  est la valeur absolue de la charge de l'électron, et  $K$  est la constante de Boltzmann.

Cette diffusion des électrons et des trous donne naissance à un courant de majoritaires  $I_M$  appelé courant de diffusion. Celle-ci maintient les porteurs majoritaires dans leurs zones respectives, sauf pour ceux qui possèdent une énergie  $W_0 = eV_0$  nécessaire pour franchir la barrière. Le courant dû à ces porteurs est de la forme[10]:

$$I_M = I_0 \exp \left( - \frac{eV_0}{KT} \right) \dots \dots \dots (I. 12)$$



**Figure I.14.** Equilibre au niveau de la jonction.

**e** : la charge de l'électron = - 1.6 10<sup>-19</sup> C

**K** : constante de Boltzmann = 1.38 10<sup>-23</sup> J/°K

**T** : température absolue, en °K

**V<sub>0</sub>** : barrière de potentiel

Par contre, cette barrière de potentiel va favoriser le passage des porteurs minoritaires (les électrons côté P, les trous côté N) conduisant à un courant  $I_s$  très faible, appelé courant de saturation  $I_s$ . Ce courant ne dépend que du nombre des porteurs minoritaires se trouvant au voisinage de la jonction et indépendant de  $V_0$ .

Les deux courants antagonistes (diffusion des majoritaires et conduction des minoritaires) s'équilibrent et leur somme est nulle en régime permanent et en absence de champ électrique extérieur[11].

$$I_M - I_s = 0$$

Et le courant de saturation s'écrit alors :

$$I_s = I_0 \exp \left( -\frac{eV_0}{KT} \right) \dots \dots \dots (I.13)$$

**I.6 Polarisation directe**

Supposons que le potentiel du semi-conducteur de type N restant constant, on relève, à l'aide d'une source d'énergie externe, le potentiel du semi-conducteur de type P, la barrière de potentiel passe, alors, de  $V_0$  à  $(V_0 - V_D)$ . Le courant dû aux porteurs majoritaires devient:

$$I_0 \exp \left( -\frac{e(V_0 - V_D)}{KT} \right) = I_0 \exp \left( -\frac{eV_0}{KT} \right) \exp \left( -\frac{eV_D}{KT} \right) = I_s \exp \left( -\frac{eV_D}{KT} \right) \dots (I.14)$$

En tenant compte du courant inverse (courant des minoritaires) il circule dans la diode (de P vers N) un courant appelé courant direct :

$$I_D = I_s \left( \exp \left( \frac{eV_D}{KT} \right) - 1 \right) \approx I_s \exp \left( -\frac{eV_D}{KT} \right) \dots \dots \dots (I.15)$$

il s'établit un champ électrique  $E_{EXT}$  de sens opposé au champ interne  $E_{INT}$  (figure I.15). Pour une certaine valeur de la tension appliquée, le champ électrique  $E_{EXT}$  compense le champ interne  $E_{INT}$ . Il s'établit alors un courant  $I_D$  à travers la jonction qui est dite "passante".

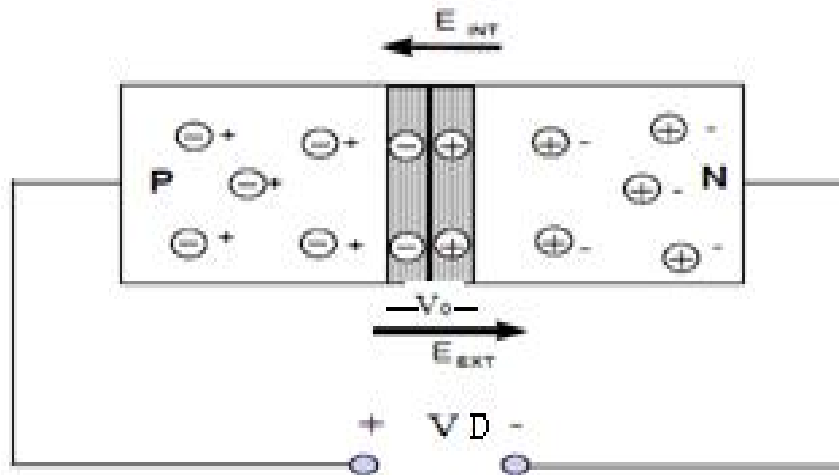


Figure I.15. jonction PN polarisée en direct.

### I.7 Polarisation inverse

Lorsqu'on relie la jonction à une source de tension, pôle positif à la zone N et pôle négatif à la zone P, on crée un champ électrique  $E_{EXT}$  orienté dans le même sens que le champ électrique interne  $E_{INT}$  (on renforce le champ électrique interne), et on empêche le passage des porteurs majoritaires : les électrons libres sont repoussés dans la zone N et les trous dans la zone P.

Il en résulte une élévation de la barrière de potentiel et une extension de la zone de charge d'espace. La jonction, qui est dite bloquée, ne laisse passer qu'un courant inverse  $I_i$  très faible. (de l'ordre du micro-ampère), Il circule dans la diode (de N vers P).

$$I_i = I_s \left( 1 - \exp - \frac{eV_D}{KT} \right) \approx I_s \dots \dots \dots (I.16)$$

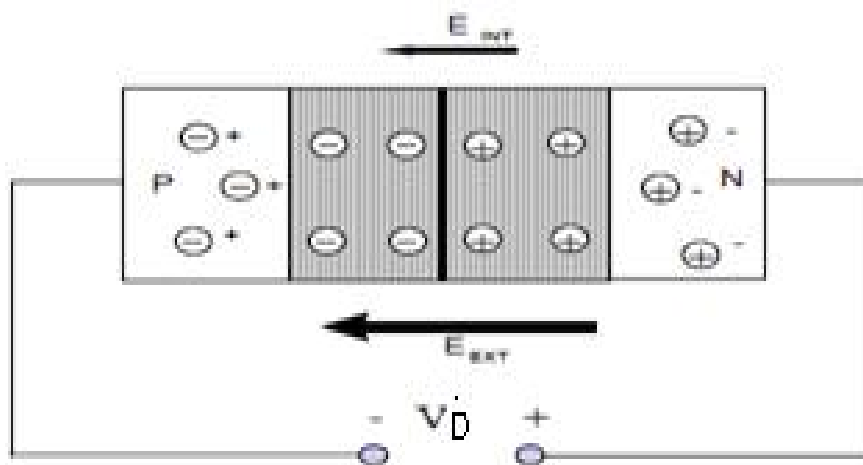


Figure I.16. jonction PN polarisée en inverse.

### I.8 Effet de la température

Pour  $V_D$  positif, la diode a un coefficient de température négatif égal à  $-2mV/K$ . Pour  $V_D$  négatif, le courant de saturation  $I_s$  varie très rapidement avec la température. IL est plus important pour le germanium que pour le silicium, et croît plus vite, ce qui devient rapidement gênant. Dans le silicium, ce courant double tous les  $279^\circ K$ .

La température de fonctionnement est un paramètre fondamental dans la détermination du fonctionnement des dispositifs à semi-conducteurs.

Dans le cas de la jonction PN le courant de saturation est essentiellement dû aux porteurs minoritaires générés par agitation thermique.

Ce courant de saturation sera donc particulièrement sensible à la température. L'effet de la température sur la caractéristique directe est déterminé par les relations suivantes[12]:

$$I_D = I_s \exp \frac{qV_j}{KT} - 1 \dots \dots \dots (I. 17)$$

Avec

$$I_D = kT^m \exp - \frac{E_{g0}}{2KT} \dots \dots \dots (I. 18)$$

Où

$m=2$  pour le Germanium,  $m=1.5$  pour le Silicium et  $m=1.5$  pour L'arséniure de Gallium. Pour trouver l'influence de la température sur la caractéristique de la jonction on dérive l'expression Simplifiée du courant soit :

$$I = I_s \exp \frac{V}{hV_T} \dots \dots \dots (I. 19)$$

Nous avons :

$$\frac{dI}{dT} = \frac{dI_s}{dT} \cdot \exp \frac{V}{hV_T} + \frac{dV}{dT} \cdot \frac{I_s}{hV_T} \exp \frac{V}{hV_T} - I_s \cdot \frac{qV}{hkT^2} \exp \frac{V}{hV_T} \dots \dots \dots (I. 20)$$

$dI_s/dT$  Représente la variation du courant inverse en fonction de la température Cherchons maintenant la variation  $dV/dT$  lorsque le courant  $I$  est maintenu constant (à l'aide d'un circuit extérieur) soit  $dI = 0$  dans l'expression précédente. Nous avons alors :

$$\frac{dV}{dT} = \frac{V}{T} - \frac{hV_T}{I_s} \cdot \frac{dI_s}{dT} \dots \dots \dots (I. 21)$$

Pratiquement pour une jonction au Silicium, à la température ordinaire nous avons :

$$dV/dT = -2,5 \text{ mV } / \text{C}^\circ$$

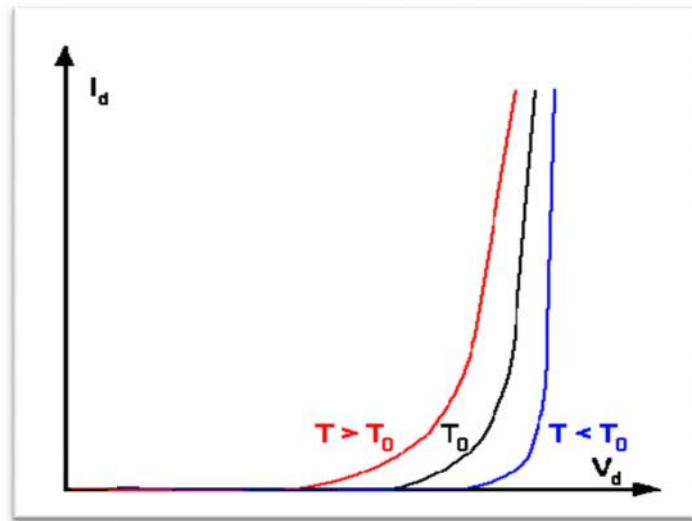


Figure I.17. Effets de la température.

## I.9 Caractéristiques électriques

### I.9.1 Caractéristique courant / tension

On a vu précédemment que le courant était négligeable pour une tension  $V_D = V_P - V_N$  négative (ceci est vrai jusqu'à une tension  $V_C$  dite tension de claquage). Au-dessus d'un certain seuil  $V_0$ , le courant direct croît très rapidement avec  $V_D$ .

Le seuil  $V_0$  (barrière de potentiel) dépend du semi-conducteur intrinsèque de base utilisé. Il est d'environ 0.2 V pour le germanium et 0.6 V pour le silicium. La caractéristique est représentée à la figure I.18 [13].

- Caractéristique directe ( $V_D > 0$ )

$$I_D = I_M = I_s \exp \left( \frac{V_D}{V_T} \right) \text{ avec } V_T = \frac{KT}{e} \dots \dots \dots (I. 22)$$

- Caractéristique inverse ( $V_D < 0$ ). Phénomène de claquage :  $I_D = -I_s$

Quand la tension appliquée dépasse la valeur spécifiée par le fabricant, le courant décroît très rapidement. S'il n'est pas limité par des éléments externes, il y a destruction rapide de la diode.

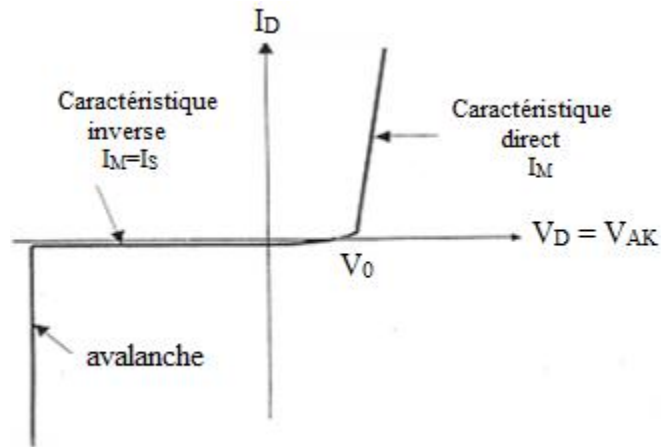


Figure I.18. Caractéristique courant / tension.

**I.9.2 Résistance différentielle ou dynamique**

La résistance dynamique étant l'inverse de la pente en un point de fonctionnement de la caractéristique. C'est la résistance dynamique au point de fonctionnement (Vd, Id). Elle est fonction du courant de polarisation Id au point étudié.

La figure I.19, donne la valeur de rd en fonction de la tension de la diode : les variations sont très importantes.

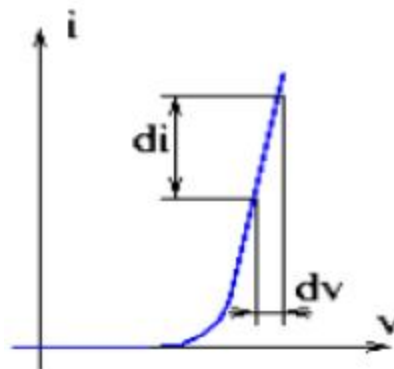


Figure I.19. Résistance dynamique.

On peut la déduire par dérivation de la relation suivante :

$$i = I_s \exp \frac{eV_D}{KT} - 1 ; \frac{1}{r} = \frac{di}{dV} = \frac{e}{KT} I_s \exp \frac{eV_D}{KT} \dots \dots \dots (I. 23)$$

Donc

$$r = \frac{dV}{di} = \frac{KT}{e I_s} \exp - \frac{e V_D}{KT} \dots \dots \dots (I. 24)$$

## I.10 Schéma équivalent

Plusieurs schémas équivalents simplifiés sont proposés pour la représentation de la diode.

### I.10.1 Diode idéale

Dans ce cas, on néglige la tension de seuil et la résistance interne de la diode. La caractéristique est alors celle de la figure I.20.



figure I.20. Diode idéale (néglige la tension de seuil et la résistance interne).

### I.10.2 Diode avec seuil

On peut continuer à négliger la résistance interne, mais tenir compte du seuil de la diode. La caractéristique devient :



figure I.21. Diode avec seuil.

Ce schéma est le plus utilisé pour les calculs :

- \* Si la diode est polarisée en directe :  $v = V_0$
- \* Si la diode est polarisée en inverse ( $v < V_0$ ) :  $i = 0$ .

### I.10.3 Diode avec seuil et résistance

Ici, on prend en compte de la résistance de la diode. Ceci peut être utile si on utilise la diode en petits signaux alternatifs et qu'on a besoin de sa résistance dynamique.



Figure I.22. Diode avec seuil et résistance.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, on s'est intéressé au semi-conducteurs et ses types ,ensuite, on a expliqué la jonction PN et la zone de charge d'espace d'une jonction qui peut être assimilée a un condensateur ,on a aussi vu l'influence de température sur les caractéristiques d'une diode.

Une étude détaillée de la diode polycristalline fera l'objet du chapitre suivant.

# Chapitre II

*Diode latérale  
polycristalline*

## Introduction

Le silicium joue un rôle prépondérant en microélectronique. Les cristaux massifs de silicium sont les matériaux de base pour la fabrication des structures et des dispositifs à semi-conducteur, comme les circuits intégrés. D'une façon générale, au-delà de ses propriétés électroniques, le silicium est important, car il est non toxique et abondant; il est extrait de la silice  $\text{SiO}_2$ , qui constitue plus de 50 % de la croûte terrestre.

Dans ce chapitre nous allons passer en revue les différents types de silicium avant d'étudier les propriétés structurales, électriques du silicium poly-cristallin. Le procédé de dépôt chimique en phase vapeur LPCVD à faible pression sera éclairci.

La dernière partie est dédiée aux différents modèles de conceptions, pour expliquer la variation des propriétés électriques des couches de silicium poly-cristallin en fonction de la concentration de dopant, de la température, de l'espèce dopante, de la taille des grains et des traitements thermiques avant et après dopage.

### II.1 Structure cristalline

Le silicium fait partie de la famille des cristaux covalents, comme tous les éléments de la colonne IV de la classification périodique des éléments (C, Ge, Sn...). Ces éléments ont quatre électrons périphériques (électrons de valence) qu'ils mettent en commun avec quatre voisins pour établir des liaisons covalentes. Ces électrons de valence sont liés, leur énergie de liaison est forte dans le cas du carbone diamant (isolant), nulle pour le métal (conducteur) et intermédiaire dans le cas du silicium ou du germanium (semi-conducteurs).

Le réseau du silicium est celui du diamant, il est constitué de deux réseaux cubiques faces centrées décalés l'un de l'autre du quart ( $1/4, 1/4, 1/4$ ) de la diagonale principale figure(II.01). Dans ce type de structure chaque atome a quatre plus proches voisins disposés au sommet d'un tétraèdre et douze seconds plus proches voisins. La maille élémentaire contient huit atomes. Sur cette figure sont indiqués aussi le paramètre cristallin  $a=5.43 \text{ \AA}$  et la distance entre deux proches voisins  $r = 2.35 \text{ \AA}$ .

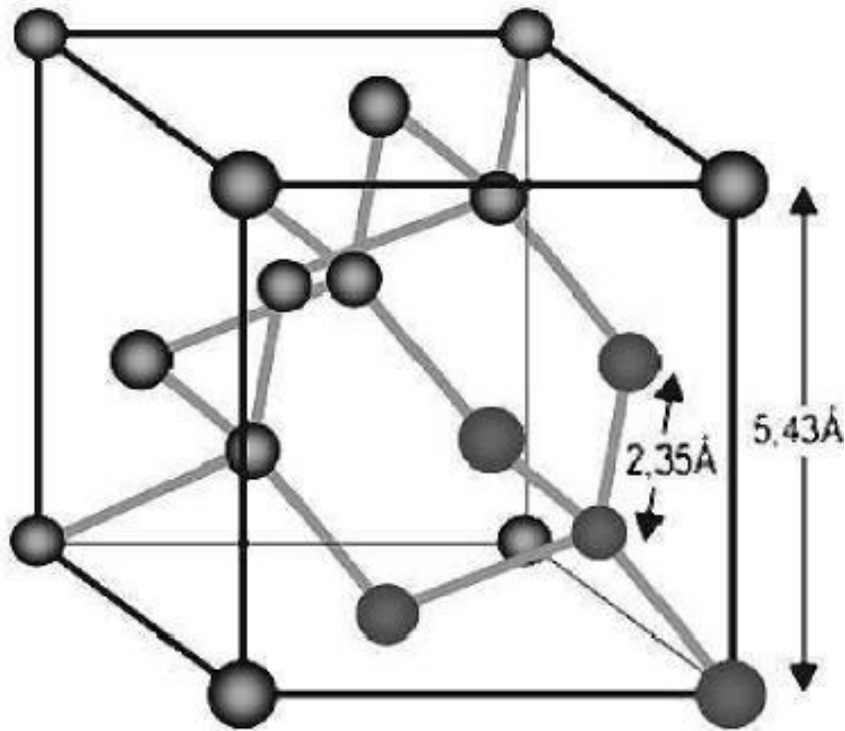


Figure II.01. Structure cristalline du diamant [14].

## II.2 Description physique du silicium poly-cristallin

Comme beaucoup d'autres éléments, le silicium peut exister à température ambiante sous différentes structures, dont les deux extrêmes sont respectivement l'état amorphe et l'état cristallin. Il est habituel de considérer que le silicium poly-cristallin, nommé dans la suite «poly-si», est composé d'une manière hétérogène de ces deux formes, c'est-à-dire de grains monocristallins séparés par des zones amorphes.

### II.2.1 Le silicium monocristallin

Dans un cristal idéal de silicium, les atomes sont arrangés selon la structure diamant avec une distance intra-atomique de  $d = 2,35 \text{ \AA}$  (Figure II.02). À ce type de liaison correspondent des états électroniques, conduisant à des bandes d'énergie permises et interdites pour les électrons. La bande interdite, appelée « gap », sépare ainsi la bande permise inférieure, appelée bande de valence ( $E_v$ ), de la bande permise supérieure, appelée bande de conduction ( $E_c$ ). Au zéro absolu, la bande de valence est pleine alors que la bande de conduction est vide; l'énergie les séparant est égale à  $E_g = 1,12 \text{ eV}$  à température ambiante (figure II.03).

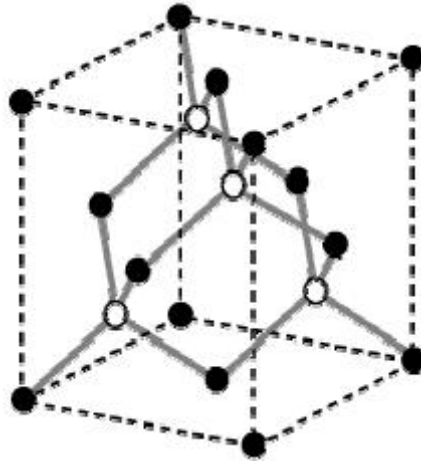


Figure II.02. Maille cubique conventionnelle de la structure diamant.

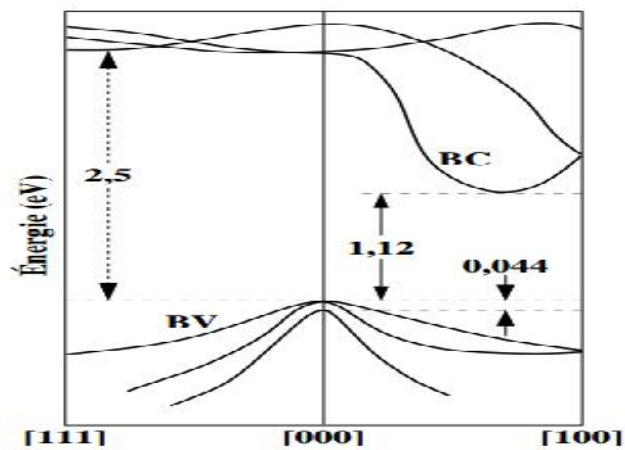
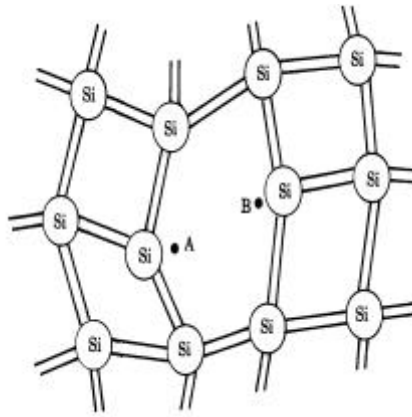


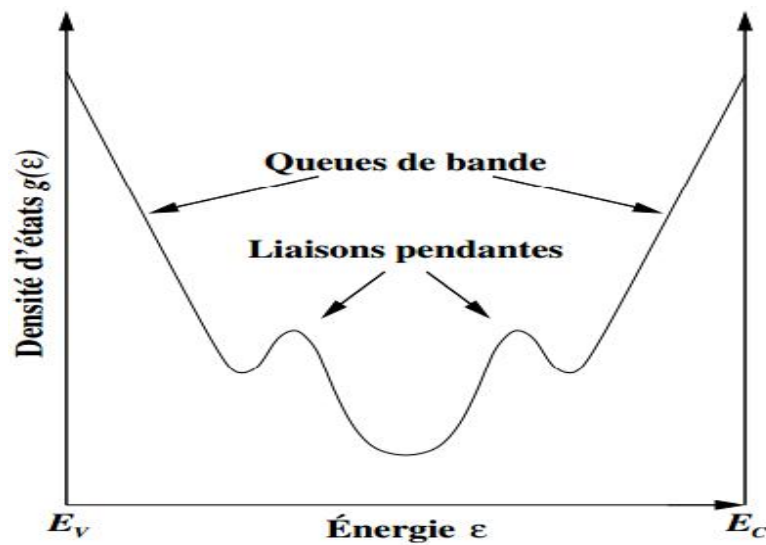
Figure II.03. Bandes d'énergie dans le silicium [15].

## II.2.2 Le silicium amorphe

L'arrangement des atomes dans le silicium amorphe n'est pas régulier. En effet, des distorsions apparaissent dans le réseau, induisant une distribution des états électroniques, ce qui se traduit par l'apparition d'états localisés dans la bande interdite en haut de la bande de valence et en bas de la bande de conduction. Ils forment ce que l'on appelle les queues de bande. D'autre part, ces distorsions peuvent devenir suffisamment importantes pour empêcher une liaison de se former et ainsi donner lieu à des liaisons insatisfaites que l'on appelle également liaisons pendantes (Figure II.04). On suppose des formes Gaussiennes pour la distribution énergétique des états de liaisons pendantes (Figure II.05).



**Figure II.04.** Liaisons pendantes.



**Figure II.05.** Densité d'états en échelle logarithmique dans la bande interdite du silicium amorphe ( $E_V$  : bande de valence,  $E_C$  : bande de conduction).

Le silicium amorphe est distingué du silicium cristallin par des avantages telles que :

- Possibilité de le déposer sur des grandes surfaces.
- Possibilité de le déposer sur des surfaces non planes ou souples : intéressant pour la déposition sur cylindres ou sphères (axes de symétrie).
- Facilité de fabrication.
- Forte absorption de la lumière visible.
- Peu de dégradation par les rayons X.
- Bande interdite plus élevée (1,75 eV; 1,12 eV pour le silicium cristallin), qui permet d'obtenir des courants inverses dans l'obscurité plus faible.

Le silicium amorphe a aussi quelques inconvénients :

- Beaucoup de défauts, dans la structure.
- Faible mobilité des porteurs libres.

### II.2.3 Le silicium poly-cristallin

On peut imaginer des structures intermédiaires entre ces deux états extrêmes. En particulier, il peut exister des phases constituées de l'état monocristallin et de l'état amorphe, c'est ainsi que l'on définit le silicium poly-cristallin : ce matériau est constitué de grains monocristallins séparés entre eux par des zones désordonnées et riches en défauts cristallins, que l'on peut assimiler à du silicium amorphe et que l'on nomme joints de grains (Figure II.06).

Chacun de ces deux composants du poly-si, grains et joints de grains, possède des caractéristiques propres que nous rappelons brièvement.

Le grain peut être défini par sa taille et par sa qualité cristalline. En effet, parler de grain monocristallin constitue un abus de langage car celui-ci n'est pas exempt de défauts. Ces défauts peuvent être en pratique des dislocations ou des défauts d'empilement. Les dislocations induisent l'apparition de liaisons pendantes, qui sont électriquement actives. La densité de ces défauts détermine donc la qualité du grain. De plus ces grains ont une orientation aléatoire entre eux contrairement aux substrats de silicium monocristallin.

Les caractéristiques essentielles du joint de grains sont ses dimensions, c'est-à-dire son épaisseur, et également sa densité de défauts. Pour résumer, on peut donc distinguer plusieurs types de silicium poly-cristallin, que l'on peut définir selon les critères suivants [16] :

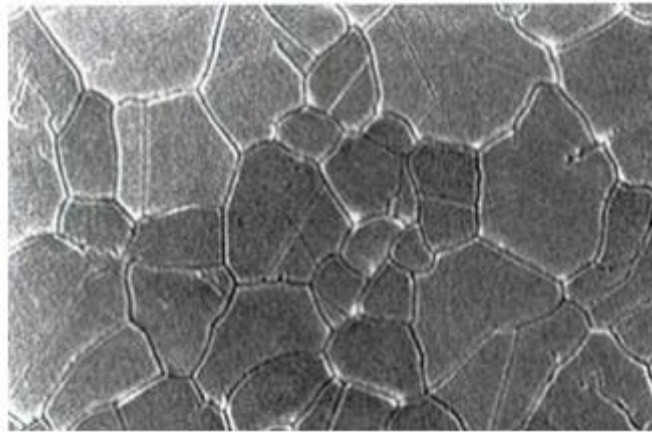
- Texture et taille de grains.
- Densité de défauts intra et inter granulaire.
- Rapport du volume cristallin sur le volume amorphe.
- Porosité.

Ces paramètres vont dépendre des conditions de dépôt, de la cristallisation et du post-traitement du silicium (recuit, hydrogénation...).

Ces caractéristiques structurales introduisent, de la même façon que pour le silicium amorphe, des états localisés dans la bande interdite (voir figure II.05).

Ces états entraînent la capture de porteurs libres dans le Poly-Si. Ce phénomène de piégeage des porteurs joue un rôle très important dans le mécanisme de conduction dans le Poly-Si [17][18]. Nous aborderons plus en détails l'incidence de ce phénomène lors de l'étude des caractéristiques électriques d'une diode.

Des travaux effectués ont montré que le silicium déposé amorphe puis cristallisé a de meilleurs propriétés structurales et électriques que le silicium déposé directement sous une forme poly-cristalline [19].

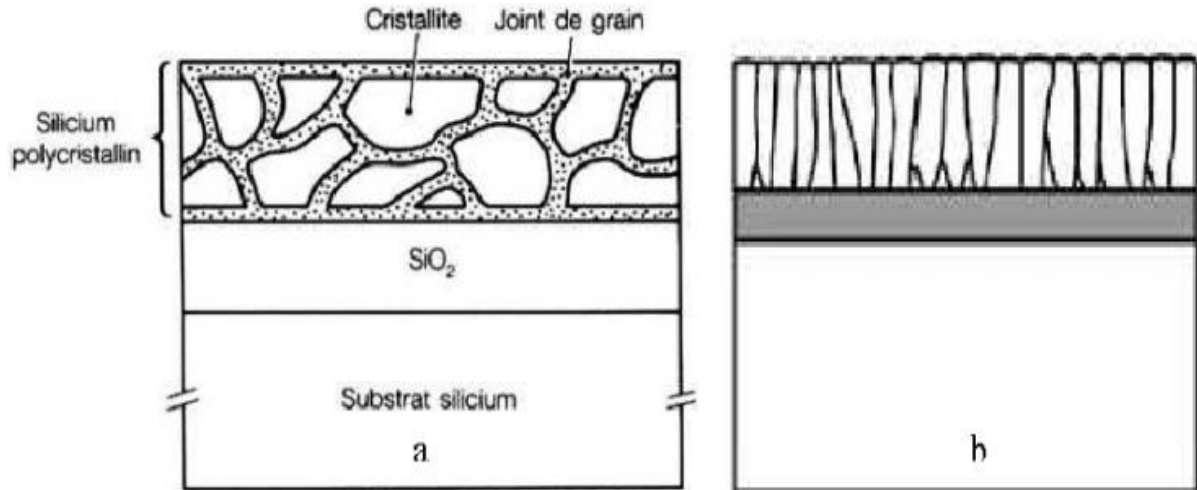


**Figure II.06.** Joints de grains (Vue MEB : Microscopie électronique à balayage).

## **II.3 Propriétés structurales du silicium poly-cristallin**

### **II.3.1 Structure d'un film de silicium poly-cristallin**

Le silicium poly-cristallin est composé de grains et de joints de grains. Les grains sont considérés comme des cristallites de silicium. Les joint de grain est l'interface entre deux grains d'orientation cristalline différente. Les joints de grains sont des plans de défauts (liaisons pendantes ou contraintes, lacunes, interstitiels...). Le film de silicium poly-cristallin colonnaire possède des grains traversant verticalement son épaisseur.



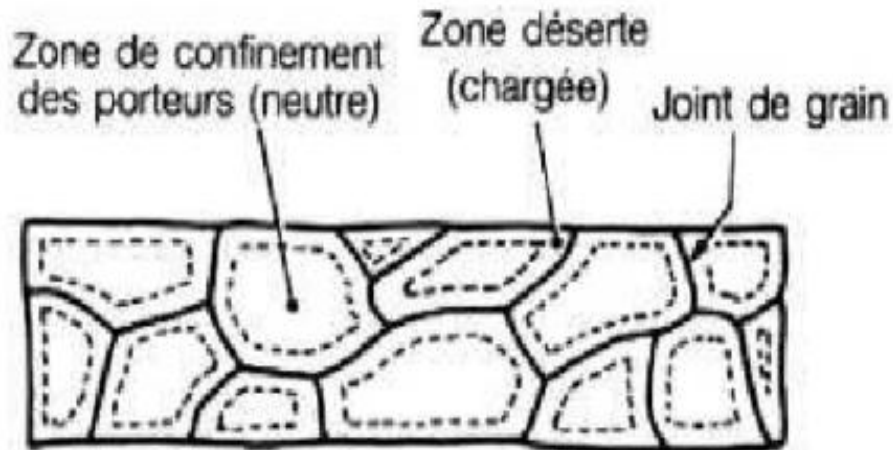
**Figure II.07** Structure granulaire (a) et colonnaire (b) du poly-silicium.

Pour un film de silicium poly-cristallin colonnaire, la structure peut être décrite par une approximation d'homogénéisation locale. La densité de joints de grains est égale à la surface totale des joints de grains par unité de volume de silicium poly-cristallin. Elle est homogène à l'inverse d'une unité de longueur.

Pendant un traitement thermique, les phénomènes de croissance des grains sont susceptibles de diminuer la densité de joints de grains[20]. La présence d'impuretés peut augmenter cette croissance. Il a été ainsi démontré, qu'en fonction de leur concentration, les dopants de types N (comme l'arsenic et surtout le phosphore) accélèrent la migration des joints de grains[21]. En revanche, en présence de dopants de type P (comme le bore), aucune accélération n'est observée en comparaison d'un film de silicium poly-cristallin non dopé.

La ségrégation des dopants aux joints de grains les rend électriquement inactifs. Cet effet est plus important si le rayon atomique du dopant est grand vis-à-vis du rayon atomique du silicium. Le phénomène est donc plus important pour l'arsenic que pour le bore.

Le piégeage de certains porteurs aux joints de grains y localise une charge électrique qui va confiner les autres porteurs, demeures libres, dans la région centrale du cristallite en créant une zone déserte isolante de part et d'autre du joint de grain et une barrière de potentiel qui limite le passage du courant (figure II.08).

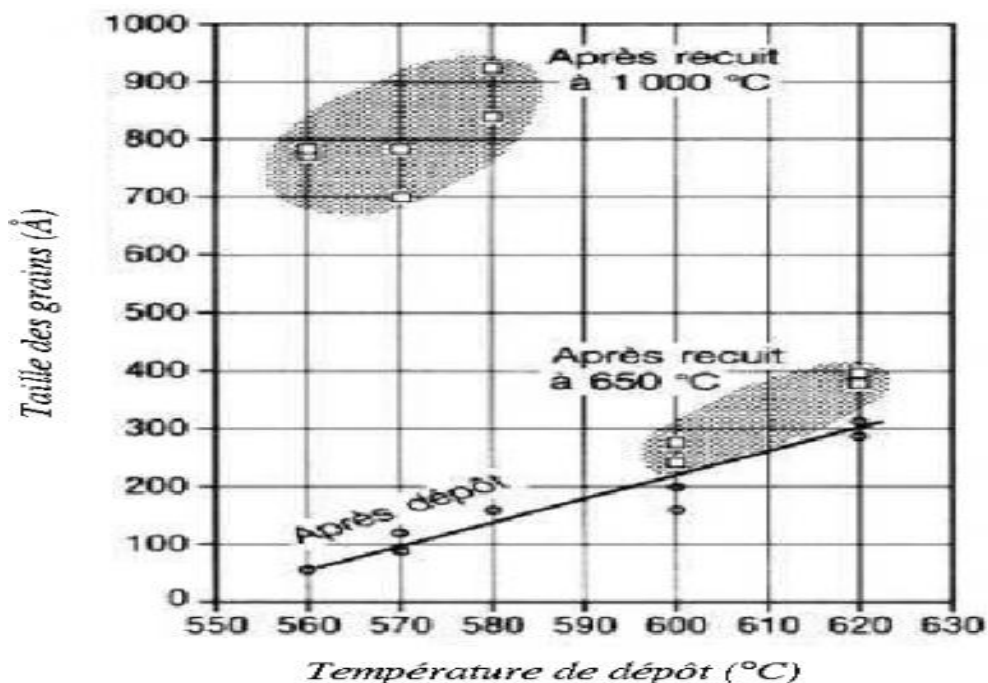


**Figure II.08.** Joint de grain, zone déserte et zone de confinement des porteurs dans un matériau poly-cristallin.

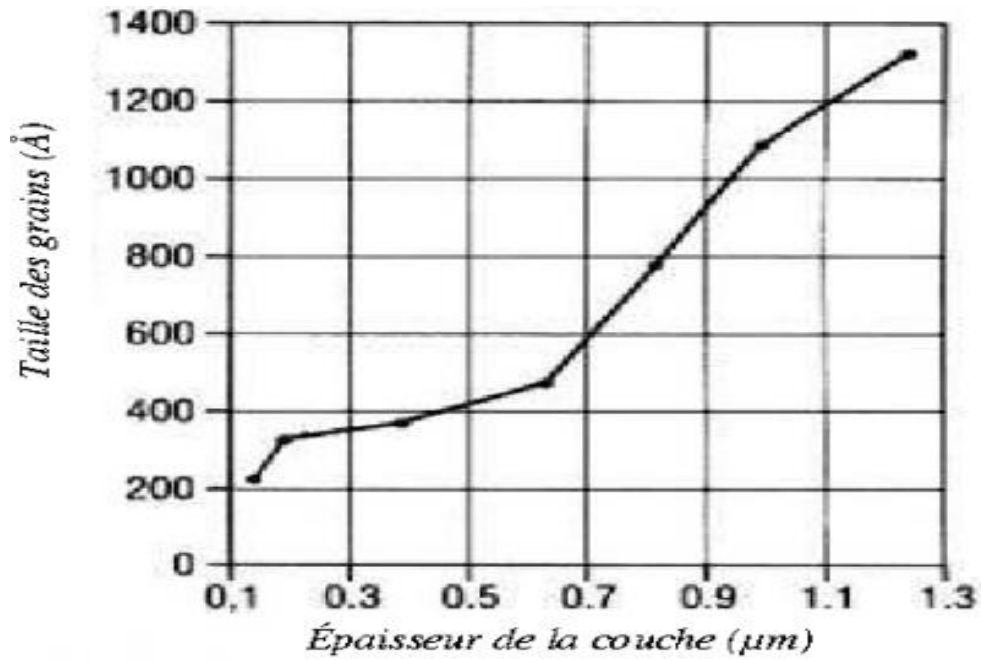
### II.3.2 Effet de la température sur la taille des grains

Le silicium poly-cristallin se présente sous la forme de grains monocristallins (cristallites) d'orientations différentes séparés par des joints de grains.

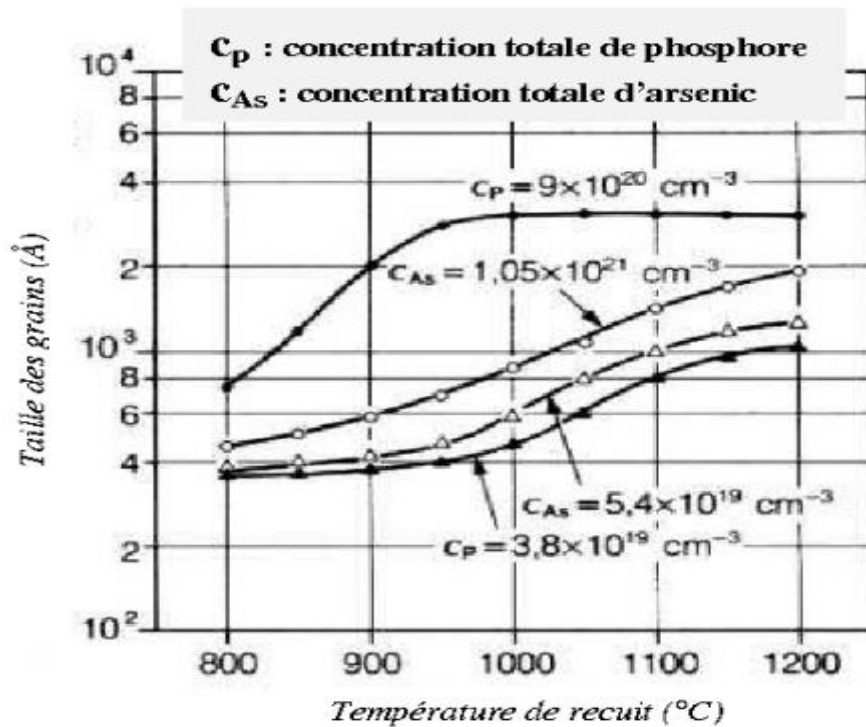
Les (figures II.09, II.10, II.11), montrent les effets des différents paramètres (dopage, épaisseur, température de dépôt et de recuit) sur la taille moyenne des grains.



**Figure II.9.** Taille moyenne des grains en fonction de la température de dépôt de silicium poly-cristallin (Épaisseur du dépôt 0.5  $\mu\text{m}$ ) [22].



**Figure II.10.** Taille moyenne des grains en fonction de l'épaisseur de la couche de silicium poly-cristallin (Température de dépôt :  $620^{\circ}\text{C}$  ; Température de recuit :  $900^{\circ}\text{C}$ ) [23].



**Figure II. 11.** Taille moyenne des grains en fonction de la température de recuit (Recuit : 30 min dans  $\text{N}_2$  sec) [24].

La figure II.09 montre que le recuit à  $1000^{\circ}\text{C}$ , après dépôt de silicium poly-cristallin, a un effet important sur la taille des cristallites dans les couches déposées à basse température.

## II.4 Propriétés électriques du silicium poly-cristallin

Plusieurs études ont été réalisées[25][26] dans le but de mieux comprendre les propriétés électriques et diode latérale du silicium poly-cristallin.

Ce matériau contient de nombreux grains de formes géométriques différentes orientés de manière désordonnée. Ces grains sont entourés de zones à forte activité électrique appelées: joints de grains, qui constituent les principaux défauts dans les semi-conducteurs poly-cristallins. Les propriétés des joints de grains, qui sont des surfaces internes comprises entre deux grains adjacents, régissent la plupart des propriétés électriques et optiques des matériaux poly-cristallins. Leurs interactions avec les porteurs de charge libres, les défauts ponctuels intrinsèques (tels que les lacunes et les interstices) et les impuretés, sont les processus physiques les plus importants à considérer.

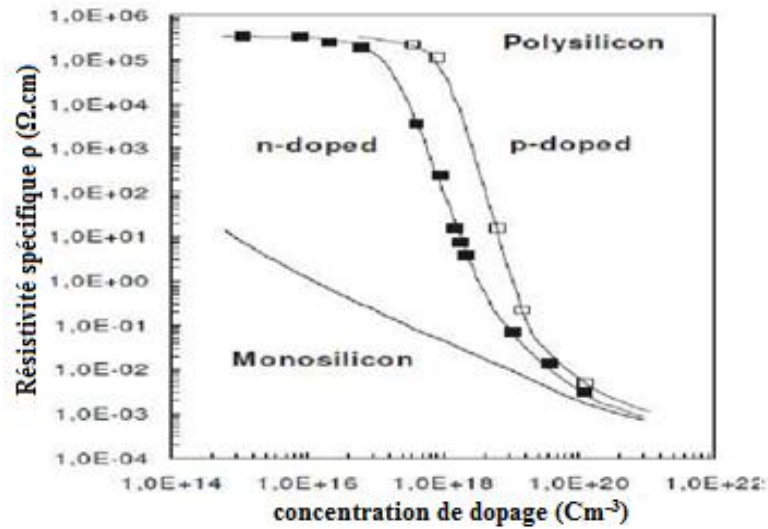
### II.4.1 Effet du dopage sur les caractéristiques électriques

En silicium poly-cristallin, la mobilité et la durée de vie des porteurs ne dépendent pas seulement de la concentration de dopage et de la température[27][28], mais aussi sur la microstructure des grains. IL est largement considérés que les paramètres de transport al 'intérieur des grains sont les mêmes que ceux de mono-silicium, mais que le comportement des mobilités et la durée de vie des porteurs aux joints de grains sont assez différentes de celles de mono-silicium. Les paramètres de transport des porteurs majoritaires dans le silicium poly-cristallin révèlent des différences significatives par rapport à celles du silicium monocristallin. Ces différences dépendent de la concentration de dopage et la taille des grains du matériau poly-cristallin.

Les caractéristiques électriques de si-poly de type P montrent que ses propriétés sont différentes de ceux de type P. Le comportement particulier de la résistivité est montré par la (figure II.12).

La résistivité" d'un matériau poly-cristallin, de type N ou de type P est élevé pour les faibles dopages, décroît rapidement aux dopages intermédiaires, pour que finalement se compare avec les valeurs du silicium monocristallin a des concentrations élevées de dopage (figure II.12). Toutefois, pour des concentrations de dopant entre  $10^{17}$  et  $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , le silicium poly-cristallin de type N et P présentent une différence significative.

Le si-poly de type N a une résistivité inférieure comparée à celle de type P.

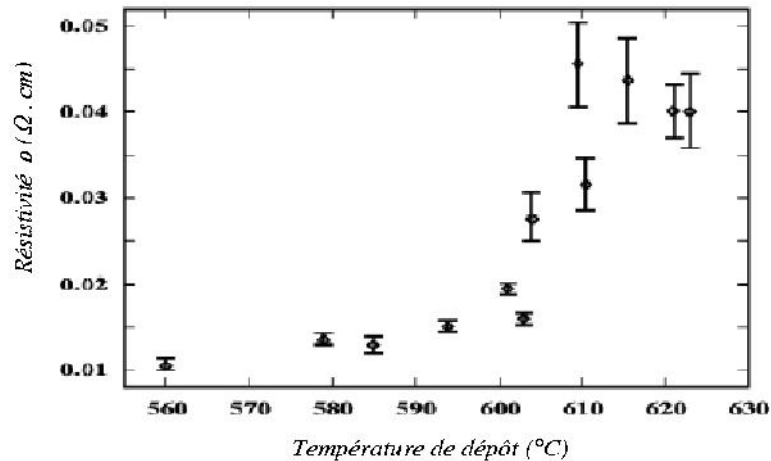


**Figure II.12.** Résistivité du silicium poly et monocristallin en fonction du niveau de dopage [29].

#### II.4.3 Influence de la température de dépôt sur la résistivité du silicium poly-cristallin

Dans les joints de grains, la jonction de deux orientations cristallines qui se rencontrent provoque la création de liaisons pendantes. Lors du dopage du silicium poly-cristallin, les atomes dopants s'insèrent majoritairement dans les joints de grain et se fixent ces liaisons pendantes, rendant les joints de grain électriquement neutres. Ils se comportent alors comme des barrières électriques similaires à des barrières latérales [30] ou tunnel.

La résistivité du matériau dépend, elle aussi, des conditions de dépôt. Si le silicium poly-cristallin est déposé à une température supérieure à  $T$ , il en résulte un nombre de pièges plus important et donne une barrière de potentiel et une épaisseur des joints de grains plus importante. Ainsi, la résistivité des joints de grains étant supérieure à celle des grains, il en résulte une plus grande résistivité du silicium poly-cristallin (figure II.13).



**Figure II.13.** Résistivité du silicium poly-cristallin en fonction de la température de dépôt [31].

De même, les conditions de dépôt du silicium poly-cristallin influent énormément sur ses contraintes mécaniques intrinsèques, qui sont généralement négatives (dépôt en compression).

## II.5 Obtention des films minces de Si poly-cristallin par la technique LPCVD

Durant ces dernières années, l'industrie des composants et circuit intégrés au silicium porte un intérêt croissant aux films poly-cristallin préparés par la technique chimique de dépôt en phase vapeur à basse pression LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition). Elles sont de plus en plus fréquemment utilisées pour la réalisation de composants électronique, depuis les cellules solaires jusqu'aux dispositifs de très petites dimensions de la microélectronique. Le développement et les applications de ces films dépendent essentiellement de l'amélioration de ces performances, liés directement aux conditions d'obtention et d'un éventuel traitement ultérieur.

### II.5.1 Four de dépôt LPCVD

C'est un four horizontal à murs chauds, dimensionné pour des plaquettes 4 pouces, diamètre intérieur du four 135 mm (voir figure II.14) [32]. La régulation en température se fait par un système comportant trois éléments chauffants, assure le maintien d'une température constante à  $\pm 5^\circ\text{C}$  dans une zone de 70 cm au milieu du tube. La mesure de la température se fait avec des thermocouples de type R (Platine/Platine-Rhodium 10%). Les débits des gaz réactants pouvant être utilisés à savoir le silane ( $\text{SiH}_4$ ), le di silane ( $\text{Si}_2\text{H}_6$ ) et l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) (éventuellement) sont contrôlés par des débitmètres massiques TYLAN, dont la valeur de débit maximum est de 200 s cm. Au cours d'un dépôt,

l'évacuation des produits de réaction se fait à l'aide d'un groupe de pompage ROOTS d'Alcatel RSV250, incluant une pompe primaire. Le débit de pompage est supérieur à  $150 \text{ m}^3/\text{h}$  pour des pressions entre 0.02 à 7 mbar. La pression dans le tube est réglée automatiquement à l'aide d'une vanne papillon par l'intermédiaire de deux capteurs de type capacitif placés à l'entrée du tube. Le disilane ( $\text{Si}_2\text{H}_6$ ), utilisé comme nouvelle source gazeuse pour les dépôts de silicium par LPCVD, semble offrir de meilleures potentialités. L'étude entreprise par NAKAZAWA [33] confirme l'amélioration de la cristallisation, de la taille des grains et par conséquent de la mobilité des porteurs apportée par l'utilisation du disilane.

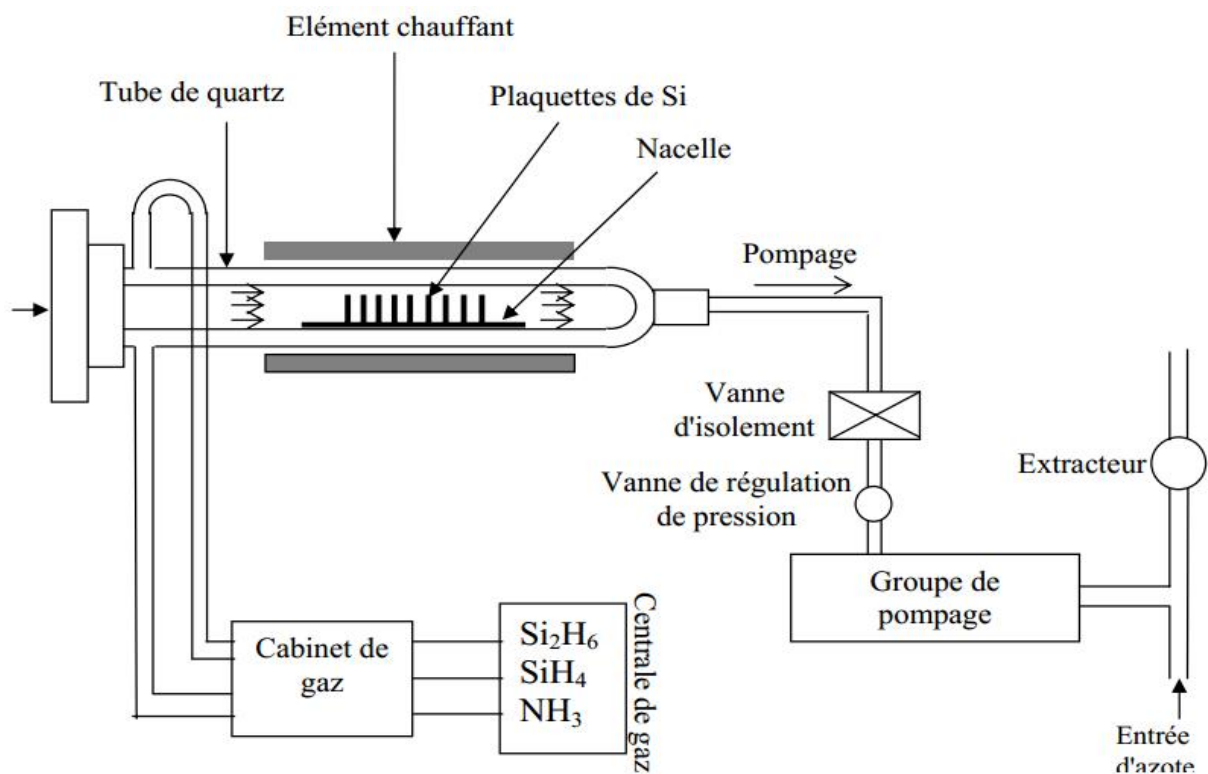


Figure II.14. Diagramme schématique du four de dépôt LPCVD [32].

### II.5.2 Avantage et inconvénient du dépôt LPCVD

Un four industriel LPCVD [32] permet de traiter un grand nombre de plaquettes, lors d'un même cycle de dépôt, tout en obtenant des couches de bonne qualité et d'épaisseur uniforme sur toutes les plaquettes, avec une réduction de température et une faible consommation de gaz. Ainsi, la technique LPCVD permet de répondre à la double préoccupation de recherche de la qualité des couches tout en abaissant le coût du procédé en milieu industriel [34]. Car par cette méthode on peut contrôler l'orientation et la structure, avec une bonne adhérence sur les substrats. L'inconvénient majeur de cette

technique est la limitation de température, car certains réacteurs chimiques ont besoin de très hautes températures qui dépassent la température que doit supporter le substrat. Ce qui risque d'entraîner la détérioration du substrat ou la modification des propriétés physiques du matériau.

## **II.6 Modélisation de la conduction électrique dans des couches de silicium poly-cristallin**

Plusieurs modèles ont été proposés pour expliquer la variation des propriétés électriques des couches de silicium poly-cristallin en fonction de la concentration de dopant, de la température, de l'espèce dopante, de la taille des grains et des traitements thermiques avant et après dopage.

### **II.6.1 Modèle de ségrégation des dopants**

Ce modèle a été proposé par Cocher et Sidgwick[35], pour expliquer la variation de la résistivité en fonction de la concentration de dopant : l'hypothèse de départ est que les joints de grains constituent des sites préférentiels pour la ségrégation des atomes de dopant. Pour les faibles concentrations de dopant, presque tous les atomes sont localisés aux joints de grains, ou ils sont supposés neutres et électriquement inactifs. En conséquence, la quantité de dopant à l'intérieur des grains est réduite, et la concentration de porteurs beaucoup plus faible que celle correspondant à la concentration totale de dopant supposée uniformément distribuée. Lorsqu'on augmente le dopage, les joints de grains deviennent saturés en dopant, et les atomes se retrouvent uniformément distribués à l'intérieur des grains. Par conséquent, la concentration en porteurs libres rejoint celle en dopant, et la résistivité du film de silicium poly-cristallin qui a d'abord diminué très rapidement, croît linéairement avec la concentration de dopant aux forts dopages.

Ce modèle, basé sur le mécanisme de la ségrégation des dopants, n'est pas en mesure d'expliquer la variation de la résistivité avec la température, et le minimum de la mobilité de Hall des porteurs, observé aux concentrations intermédiaires de dopant.

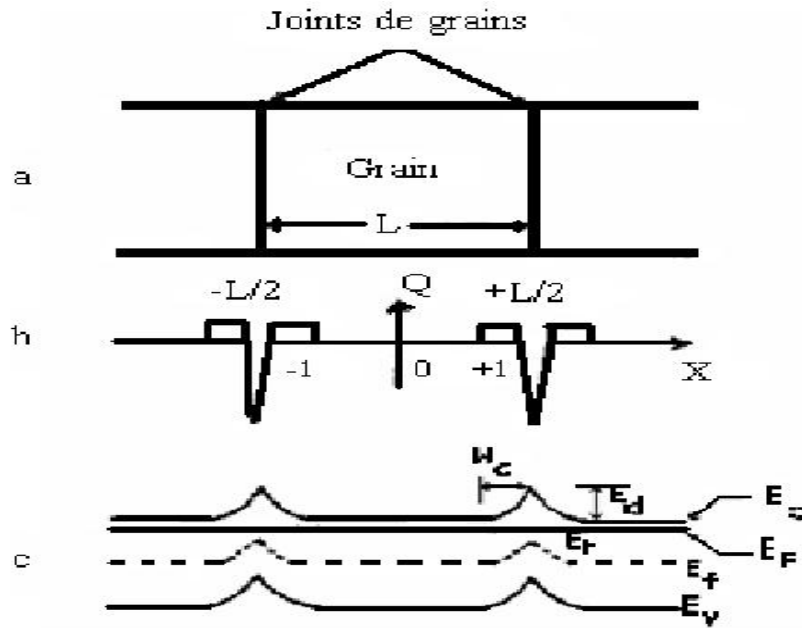
### **II.6.2 Modèle de piégeage des porteurs**

Ce modèle a été proposé pour la première fois par Kamins[36], pour expliquer les propriétés électriques des couches de silicium poly-cristallin. Cependant, Seto [37] a été le premier à développer ce modèle en faisant une étude quantitative, et à démontrer sa validité.

Ce modèle suppose que les joints de grains contiennent un grand nombre d'états pièges initialement neutres, et que les atomes de dopant sont uniformément distribués à l'intérieur des films de silicium poly-cristallin. En capturant des porteurs, les états pièges deviennent chargés électriquement, et créent ainsi des régions désertées de porteurs et des barrières de potentiel de part et d'autre de chaque joint, ce qui limite le passage des porteurs libres d'un grain à un autre. Si la concentration de dopant est plus faible que celle des états pièges, presque tous les porteurs sont piégés ; en conséquence, la concentration des porteurs libres est très faible et la résistivité très élevée. Cependant, quand on augmente la concentration de dopant, les états pièges se saturent en porteurs, les barrières de potentiel atteignent leur maximum et la mobilité son minimum, ce qui entraîne une augmentation rapide de la concentration des porteurs libres et une chute brusque de la résistivité. Sous l'effet d'une nouvelle augmentation du dopage, la largeur des régions désertées diminue, la hauteur des barrières de potentiel décroît et la mobilité des porteurs augmente. Finalement, aux fortes concentrations de dopant, la largeur des régions désertées devient très étroite avec des barrières de potentiel de très faible hauteur, la concentration des porteurs libres approche la valeur de la concentration de dopant et la résistivité approche celle du silicium monocristallin.

Seto[37] a développé en détail le modèle de piégeage des porteurs, qui a permis d'expliquer d'une façon satisfaisante l'allure des caractéristiques électriques du silicium poly-cristallin. Le modèle de Seto illustré par la figure (II.13) est basé sur un certain nombre d'hypothèses :

- Grains identiques de taille  $L$ .
- Les joints de grains ont une épaisseur négligeable par rapport à la taille des grains, et contiennent une densité d'états pièges  $Q_b$ , situés à un niveau d'énergie  $E_t$  par rapport au niveau intrinsèque dans la région neutre.
- Les pièges sont initialement neutres et se chargent en piégeant des porteurs.
- Présence d'un seul type d'atomes de dopant uniformément distribués et totalement ionisés avec une concentration  $N$  dans la couche de silicium polycristallin.



**Figure II.15** illustration du modèle de Seto pour le silicium poly-cristallin de type N.

- a- Structure d'un film de silicium poly-cristallin.
- b- distribution de charges aux joints et à l'intérieur des grains.
- c- diagramme de bandes d'énergie.

Le modèle de piégeage des porteurs permet une meilleure explication des propriétés de conduction électriques dans des couches de silicium poly-cristallin. Cependant, il ne peut pas expliquer leurs variations en fonction des traitements thermiques et des différentes espèces dopantes. Finalement, pour permettre une bonne explication des propriétés de conduction électriques dans des couches de silicium poly-cristallin, les deux modèles doivent être combinés, c'est-à-dire qu'on doit se baser sur le modèle de piégeage en tenant compte de la ségrégation des dopants .

## **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons étudié les propriétés structurales, électriques du silicium polycristallin. Cette étude nous a permis de déduire que la taille moyenne des grains du si-poly dépend du dopage et de la température de dépôt à des traitements thermiques. Nous avons montré, qu'aux concentrations moyennes de dopants, la résistivité décroît brusquement. La modélisation de la conduction électrique des couches de silicium polycristallin a aussi été abordée; il a été montré que l'utilisation du modèle de piégeage en tenant compte de la ségrégation des dopants, permet de mieux expliquer les propriétés de conduction électriques dans le poly-silicium. Avant d'entamer la simulation, il est nécessaire de donner une idée sur l'outil de simulation suggéré. Ce dernier fera l'objet du chapitre suivant.

# Chapitre III

*Simulation des étapes  
technologiques des diodes  
réalisées sur le silicium  
polycristallin*

## Introduction

Ce chapitre, est dédié à la simulation des différentes étapes technologiques de fabrication de jonctions PN. Nous présenterons les phases technologiques de la conception d'une jonction latérales réalisées sur un silicium polycristallin.

Nous débuterons par une présentation détaillée du logiciel de simulation TCAD-SILVACO, son principe de fonctionnement est éclairci, une description exhaustive des modules de simulation: ATHENA pour la simulation des processus technologiques, et ATLAS pour la simulation du comportement électrique des composants (caractérisation). Puis, nous terminerons par une description des différentes étapes de simulation du procédé technologique telles que l'oxydation, l'implantation, la diffusion, la gravure, etc....

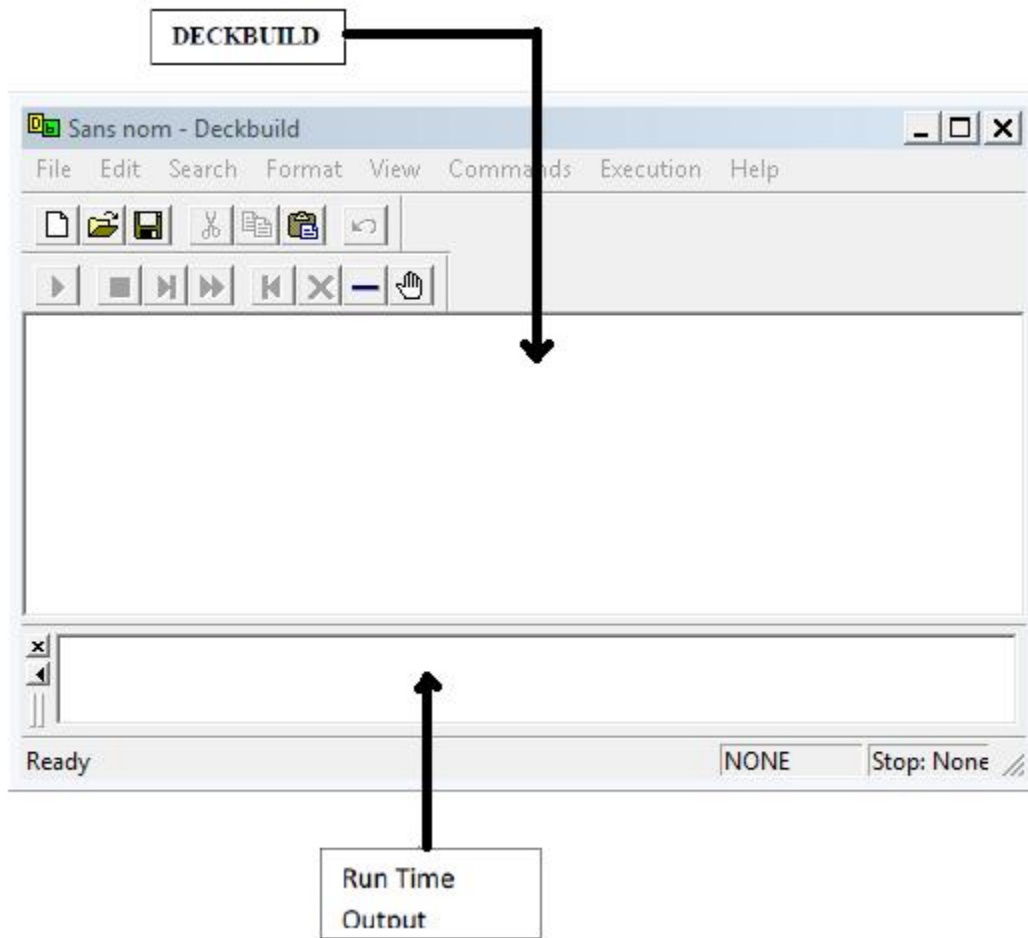
### III.1 Conception par simulation (TCAD-SILVACO) du jonction PN latérale

#### III .1.1 Présentation du logiciel TCAD-SILVACO

**SILVACO** vient de l'abréviation (**SiliconValley Corporation**) est un logiciel de simulation électrique et de processus technologique des dispositifs électroniques à semi-conducteur. Il a été fondé en 1984 par Dr. Ivan PESIC [38][39], il est composé de plusieurs outils (tels que ATLAS, ATHENA, DECKBUILD...) qui s'unissent pour obtenir une simulation complète. Ces outils démarrent par la compréhension de la physique de base des semi-conducteurs, isolants et conducteurs. L'environnement virtuel de la simulation de la technologie de Fabrication permet aux simulateurs ATHENA et ATLAS de préparer, exécuter, optimiser, et analyser des expériences sur les semi-conducteurs pour réaliser des dispositifs optimales. Les outils de base les plus importants de SILVACO sont:

#### III.1.2 DECKBUILD

C'est un environnement où on peut inviter les simulateurs ATHENA et ATLAS simultanément ou, à tour de rôle, pour définir le programme de simulation : La structure, le maillage et les calculs électriques nécessaires peuvent être également définis dans DECKBUILD [40].



**Figure III.1.** L'outil Deckbuild.

**Run-Time Output** : une fenêtre où on voit les erreurs de programmation et les avertissements après la compilation.

### III.1.3 ATHENA

Il est fréquemment employé en même temps avec le simulateur de dispositif d'ATLAS. ATHENA fournit une plateforme facile à employer, modulaire, et extensible pour simuler l'implantation ionique, la diffusion, la gravure, le dépôt, la lithographie, et l'oxydation...etc. donc, il prévoit la structure physique qui résulte du traitement. Ces structures physiques sont employées comme des entrées en ATLAS, qui prévoit alors les caractéristiques électriques liées à des conditions de polarisation indiquées.

### III.1.4 DEVEDIT

C'est un environnement où on peut dessiner les structures des dispositifs (dimension, dopage, ...), Il peut être employé pour produire d'une nouvelle maille sur une structure existante, pour modifier un dispositif ou pour créer un dispositif à partir de zéro.

Ces dispositifs peuvent alors être employés par les simulateurs 2D et 3D de SILVACO. DEVEDIT peut être employé par une interface utilisateur graphique (GUI abréviation de Graphiques User Interface) ou comme simulateur sous DECKBUILD.

### III.1.5 ATLAS

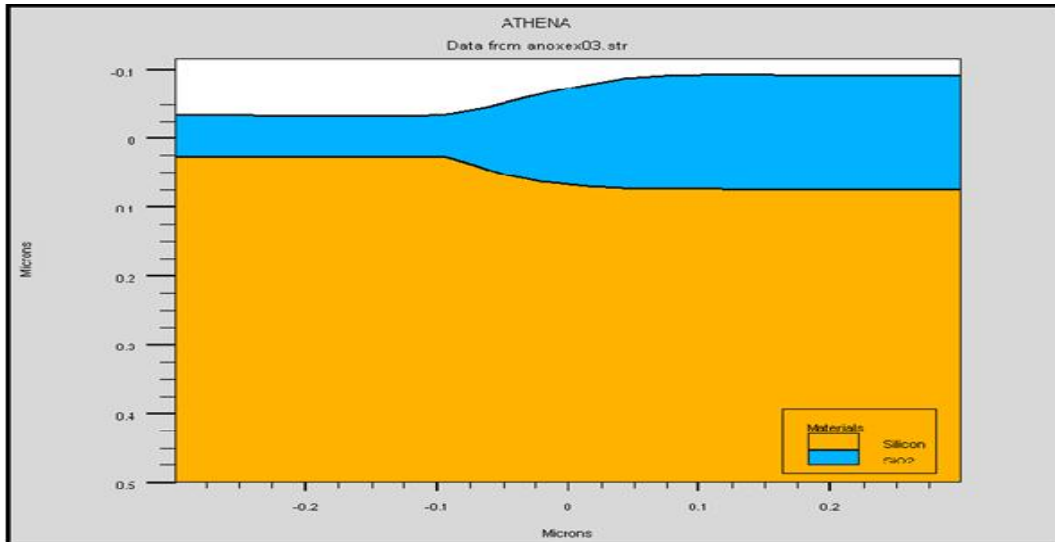
Le logiciel de simulation ATLAS est un simulateur de modélisation bidimensionnelle ou tridimensionnelle (3D) de composants capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel. En plus du comportement électrique "externe", il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les concentrations des porteurs, les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel, etc., autant de données importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques. Ceci est réalisé en résolvant numériquement l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et des trous en deux dimensions en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par l'utilisateur ou par le programme. Ce simulateur est composé de deux parties :

- Une partie traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...).
- Une partie formée des modèles physiques des composants semi-conducteurs les plus récents : modèles de recombinaisons, d'ionisation par impact, de mobilités, en température et statistiques de Fermi-Dirac et de Boltzmann notamment.

ATLAS a été conçu de façon à pouvoir utiliser les autres outils qui facilitent son utilisation tel que : ATHENA, DEVEDIT, TONYPLOT, DECKBUILD.

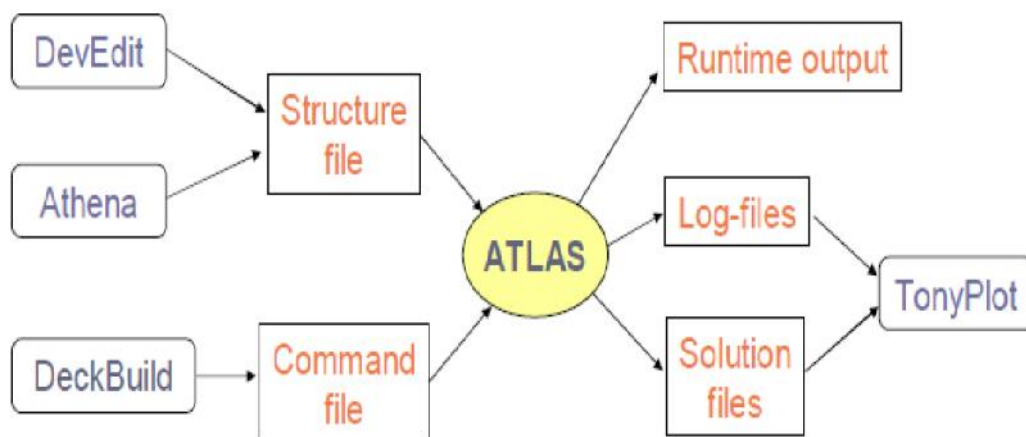
### III.1.6 TONYPLOT

Est un puissant outil conçu pour visualiser les structures 1D et 2D produits par les simulateurs de SILVACO, distributions de grandeurs diverses dans celui-ci, caractéristiques électriques...). Il fournit également beaucoup de fonctions spécifiques de visualisation de TCAD telles que les lignes de la coupe 1D, l'animation des marqueurs pour exposer la variation des vecteurs, intégration des fichiers de données 1D ou les fichiers (.log). Il y a aussi un autre outil similaire à celui-là, sauf qu'il est conçu pour visualiser les structures 3D, nommé TonyPlot 3D. Dans ce mémoire, nous présenterons les résultats de la simulation en deux dimensions, comme c'est illustré sur la figure III.2, à titre d'exemple.



**Figure III.2.** Exemple de simulation en 2D de l'étape d'oxydation sous ATHENA [40].

Dans le schéma de la figure (III.3) nous voyons les types d'informations qui circulent en entrée et en sortie « d'Atlas »



**Figure III.3.** Présentation schématique montrant la participation des outils de SILAVACO lors de la simulation [41].

La plupart des simulations réalisées par « Atlas » utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier fichier est un fichier script contenant les commandes pour qu'Atlas s'exécute (représenté par « Fichier de commande »). Le second fichier est un « Fichier de structure » qui définit la structure qui va être simulée. A la sortie « d'Atlas », nous avons trois types de fichiers. Le premier de ces fichiers est la sortie « Runtime » qui donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation. Le deuxième type de fichier est le fichier « log » qui stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé (c'est le fichier du comportement électrique).

Le troisième fichier de sortie est le « Fichier de solution », ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions dans le dispositif en un point donné (c'est le fichier physique, il contient la structure dans un état particulier). Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation « TonyPlot ».

Dans le cadre de notre travail, on utilise uniquement les outils : DECKBUILD, ATLAS, ATHENA et TONYPLOT.

### **III.1.7 Logique de programmation**

Après la présentation de la chaîne progicielle TCAD de SILVACO, sa composition interne et le fonctionnement « d'Atlas » nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation « d'Atlas ». Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes sont organisés correctement en respectant l'ordre des étapes (voir Tableau III.1). Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte. Par exemple, si les paramètres ou les modèles de matériaux ne sont pas placés dans l'ordre adéquat, le simulateur ne les prend pas en compte [39].

**Tableau III.1.** Ordre des groupes des commandes dans un programme Atlas (les commandes fondamentales afférentes) [42].

Groupe	Commandes
Description de la structure	MESH REGION ELECTRODE DOPING
Matériaux et modèles	CONTACT MATERIAL INTERFACE DEFECTS BEAM MODELS
Sélection de la méthode numérique	METHOD
Obtenir la solution	LOG LOAD SOLVE SAVE
Analyse des résultats	EXTRACT TONYPLOT

Les commandes fondamentales sont :

- MESH : cette commande produit un maillage ou lit un maillage qui a été défini auparavant. L'élément de maille utilisé est le triangle.
- REGION : indique l'endroit des matériaux dans une maille précédemment définie. Chaque triangle doit être défini comme matériel.
- ELECTRODE : indique l'endroit et les noms des électrodes dans une maille précédemment définie.
- DOPING : indique analytiquement des profils de dopage ou prend de tels profils déjà prédéfinis dans les fichiers dédiés.

- MATERIAL : associe des paramètres physiques aux matériaux dans la maille. (Il faut faire attention parce que le logiciel a des paramètres de matériau définis par défaut pour les semi-conducteurs standard)
- MODELS : indique les carreaux constitutifs du modèle, ils indiquent les inclusions de différents mécanismes physiques, de modèles ou des autres paramètres comme par exemple la température globale pour la simulation.
- CONTACT : indique les attributs physiques d'une électrode.
- INTERFACE: indique les paramètres d'interface aux frontières de semi-conducteur/ isolant. Tous les paramètres s'appliquent seulement aux nœuds de frontière exceptés la où ils sont déjà indiqués.
- METHOD : place les méthodes numériques à employer pour résoudre les équations et les paramètres liés à ces algorithmes.
- LOG : permet à toutes les caractéristiques finales de simulation d'être sauvées dans un fichier (ouvre un fichier de type log (log en minuscule veut dire le type de fichier, LOG en majuscule veut dire la commande dans le programme)). N'importe quel type de donnée, qu'elle soit C.C., transitoire ou C.A., générée par la commande SOLVE et sauvée après la commande LOG (donc les informations sauvées sont de type électrique et elles sont, par exemple, en fonction de la tension de polarisation ou de la source de lumière). Aussi n'importe quel paramètre spécifié par la commande PROBE est stocké dans le fichier de type log. Si dans le programme il y a plusieurs commandes LOG, chaque fois le fichier log qui a été ouvert avant est fermé et un nouveau fichier log est ouvert.
- SOLVE : ordonne à Atlas d'exécuter une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.
- LOAD : charge des solutions précédentes à partir de fichiers en tant que conjectures initiales à d'autres points de polarisation.
- SAVE : sauve toutes les informations d'un point nœud du maillage dans un fichier de sortie (les fichiers de sortie sont de type structure). Les informations sauvées correspondent à un état électrique bien précis.
- EXTRACT : les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou structure.
- TONYPLOT : démarre le programme « TonyPlot » de post processus graphique des donnés.

## III.2 Spécification de la Structure du cas traité

### III.2.1 Le Maillage

Les spécifications des mailles impliquent une compensation entre les conditions de l'exactitude et l'efficacité numérique. L'exactitude exige une maille fine qui rend le programme converge facilement. L'efficacité numérique exige une maille épaisse qui réduit au minimum tout le nombre de points de grille donnant une réduction du temps d'exécution. Cette compensation entre l'exactitude et l'efficacité numérique est fréquemment une source des problèmes, elle nécessite assez d'expériences pour définir les mailles raisonnables.

La zone la plus importante dans une diode latérale est la jonction entre l'anode et la cathode. Typiquement, cette région doit être résolue avec des mailles très fines.

### III.2.2 La structure du dispositif

Après le maillage, il faut désigner la structure du dispositif que l'on veut simuler, par la définition des régions et leurs dimensions, les matériaux utilisés (Si, Poly-si, ...etc.), les additions s'ils existent et leur profil de distribution (Ge, Al...), le type et la concentration du dopage dans chaque région ont un effet très important sur les caractéristiques de la diode. Enfin, on spécifie les positions des électrodes.

### III.2.3 Les paramètres des matériaux

Pour faire une simulation d'un dispositif il faut définir les paramètres des matériaux employés dans la fabrication de ce dispositif tel que la structure de bande, la densité des états, l'affinité, et ainsi de suite les paramètres utilisés pour n'importe quelle simulation. Les valeurs de ces paramètres varient selon le type des matériaux : pour les matériaux simples sont définis par des valeurs exactes, dans les cas complexes où les matériaux sont des alliages dont des fractions molaires bien définis. Les paramètres sont déterminés avec des modèles en fonction de ces fractions ( $x$ ).

### III.2.4 Les modèles physiques pour une diode

SILVACO fournit des modèles physiques spéciaux pour la simulation d'une diode. Ces modèles peuvent être devisés en deux groupes :

Le premier est considéré comme un modèle de base et il représente:

- la dépendance de la mobilité de la concentration du dopage (CONMOB) et le champ électrique (FLDMOB).
- la variation de la bande interdite (BGN).
- la dépendance du temps de vie de la concentration (CONSRH) et la recombinaison d'AUGER (AUGER).

le second, pour les simulations bipolaires les plus précises, le modèle de mobilité devrait être utilisé avec :

- ✓ le modèle Auger de KLAASSEN (KLAAUG).
- ✓ la dépendance de la concentration SRH (SCHOKLEY READ HALL) de KLAASSEN (KLASRH).
- ✓ la dépendance du champ électrique (FLDMOB) pour modéliser la saturation de vitesse.
- ✓ BAND-TO-BAND Pour les transitions directes. Nécessaire avec des champs élevés.
- ✓ KLAASSEN les transitions directes et indirectes.
- ✓ POOLE-Frenkel Barrier.
- ✓ TRAP.COULOMBIC Cet effet consiste en l'abaissement du bord d'un puits de potentiel coulombien en présence d'un champ électrique.

### **III.2.5 Les méthodes numériques**

Plusieurs méthodes numériques peuvent être utilisées pour résoudre les équations des semi-conducteurs telle que l'équation de POISSON. En général, il y a trois approches:

- Découplé (méthode de GUMMEL).
- Couplé (méthode de Newton)
- La troisième méthode est la combinaison de ces deux premières.

### **III.2.6 Comparaison des méthodes**

Chaque itération de la méthode de GUMMEL résout une équation des sous-problèmes par rapport à sa variable primaire, tout en tenant compte d'autres variables à leurs valeurs le plus récemment calculées. Une étape de l'itération de GUMMEL est accomplie quand le procédé a été exécuté pour chaque variable indépendante. L'itération

de GUMMEL converge relativement lentement, mais la méthode ne demande pas de bonnes prédictions.

Par contre pour la méthode de NEWTON, chaque itération résout le système des inconnus ensemble. La taille du problème est relativement grande, et chaque itération prend un temps relativement long. Cependant, l'itération convergera rapidement à condition que les prédictions soient suffisamment près de la solution finale. Il est possible de combiner les deux méthodes en commençant par la méthode de GUMMEL et puis ressortir à la méthode de NEWTON si la convergence n'est pas réalisée dans un certain nombre d'itérations. L'avantage de cette troisième méthode est que l'itération de GUMMEL peut raffiner les prédictions à un point du quel l'itération de Newton peut converger.

### **III.2.7 La solution**

En effectuant une simulation, le dispositif démarre par une polarisation nulle sur toutes les électrodes. Les solutions sont obtenues par le balayage de la polarisation sur les électrodes de l'état d'équilibre, en utilisant des petits pas du variable (par exemple la tension). Une fois qu'une solution est obtenue, le courant traversant chaque électrode est calculé par l'intégration numérique. Des quantités internes, telles que les distributions des porteurs et le champ électrique dans tout le dispositif, peuvent alors être calculées ou présentées sous forme de graphes.

## **III.3 La structure de la diode latérale du cas envisagé**

### **III.3.1 Maillage du dispositif**

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bonnes simulations. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats. Pour obtenir des résultats fiables et précis, la finesse du maillage doit être définie en fonction des variations des grandeurs physiques. Le choix de maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et l'exactitude des résultats [6]. le maillage doit être très fin pour les régions telles que : les régions des jonctions, alors qu'il peut être moins serré pour d'autres régions.

La maille conçue pour notre dispositif est montrée par la figure III.4 ci-dessous.

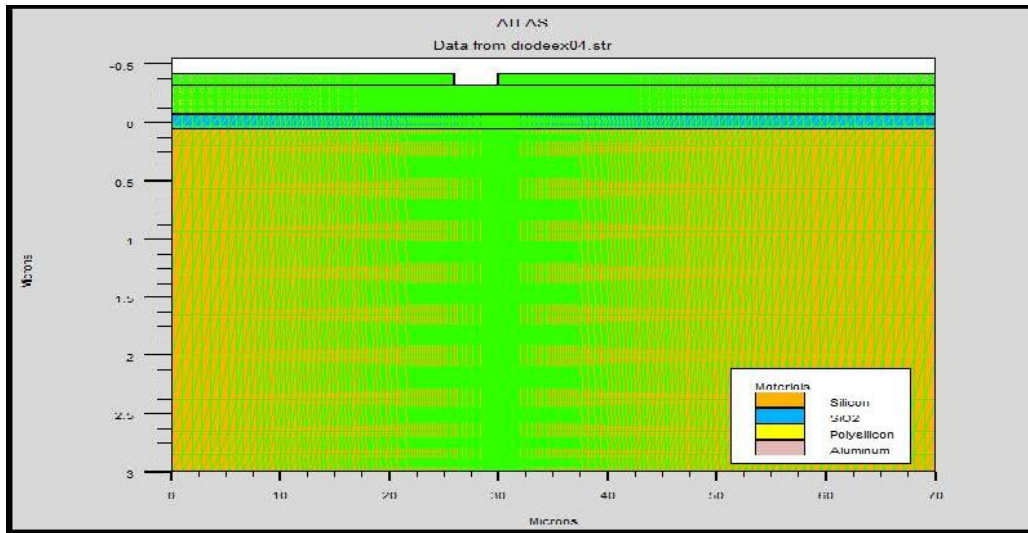


Figure III.4. Maillage du dispositif.

### III.3.2 Choix du substrat

Avant de réaliser tout composant microélectronique, il faut définir le substrat, c'est à-dire le matériau dans lequel sera réalisé le dispositif figure III.5.

Comme dans tout processus de réalisation de diode, le substrat utilisé est une plaquette de silicium d'orientation cristallographique  $\langle 100 \rangle$ , de type N et de résistivité variant de 2 à 5  $\Omega \cdot \text{cm}$ . La figure III.5 montre le substrat choisie telle quelle est donnée par SILVACO.

La couche en jaune montre la partie en silicium sur laquelle on diffuse de l'oxyde de silicium montré en bleu.

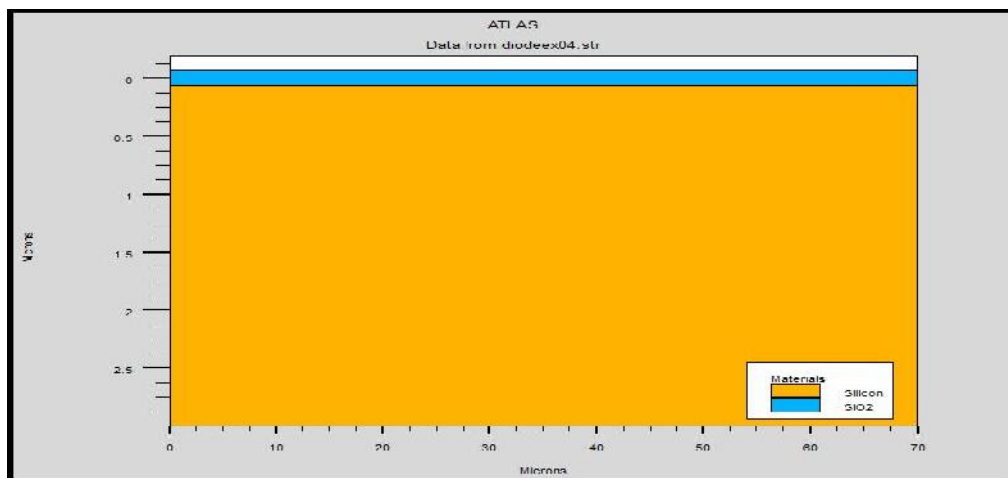


Figure III.5. le substrat utilisé.

### III.3.3 Dépôt de la couche polycristalline

La première étape consiste à faire un dépôt d'une couche polycristalline d'une épaisseur de 0.25 µm comme il est montré par la figure III.6.

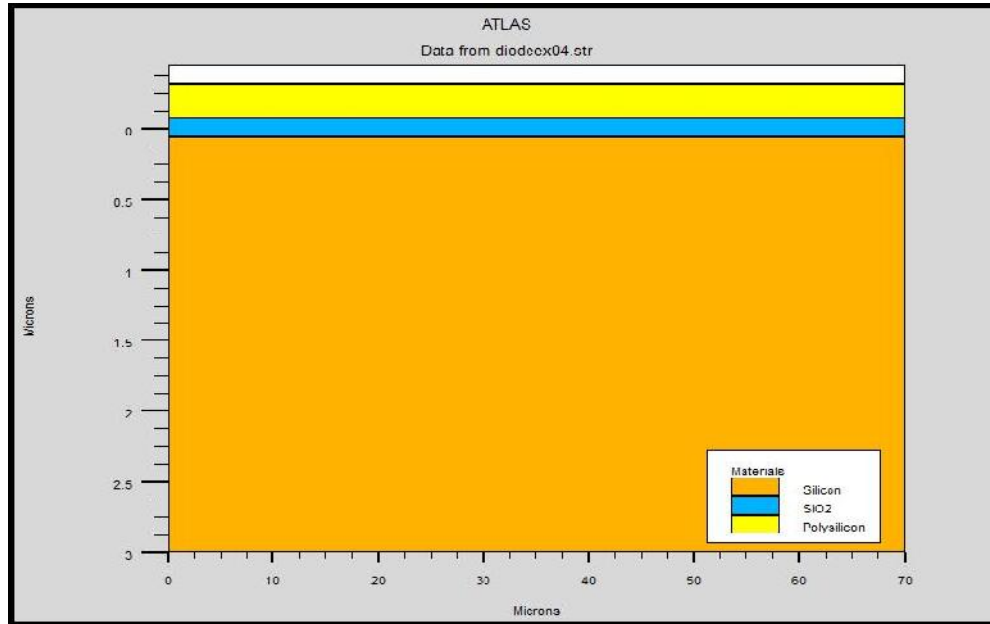


Figure III.6 Dépôt de la couche polycristalline.

### III.3.4 Implantation ionique de Bore avec recuit

Une ouverture de fenêtre pour implanter le Bore a une énergie de 60 Kev et à une dose de  $4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ .

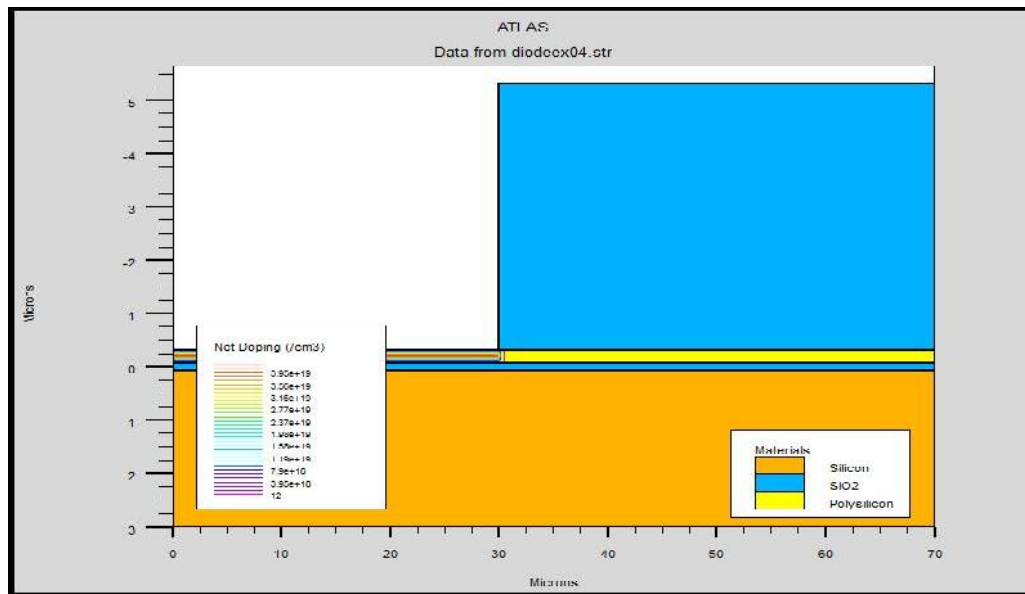


Figure III.7. Implantation ionique de Bore.

### III.3.5 Formation de l'oxyde

L'oxyde a été réalisé en utilisant une oxydation thermique humide pendant 40 min à 1100C°. Ce dernier assure la croissance d'une couche d'oxyde de 1 µm.

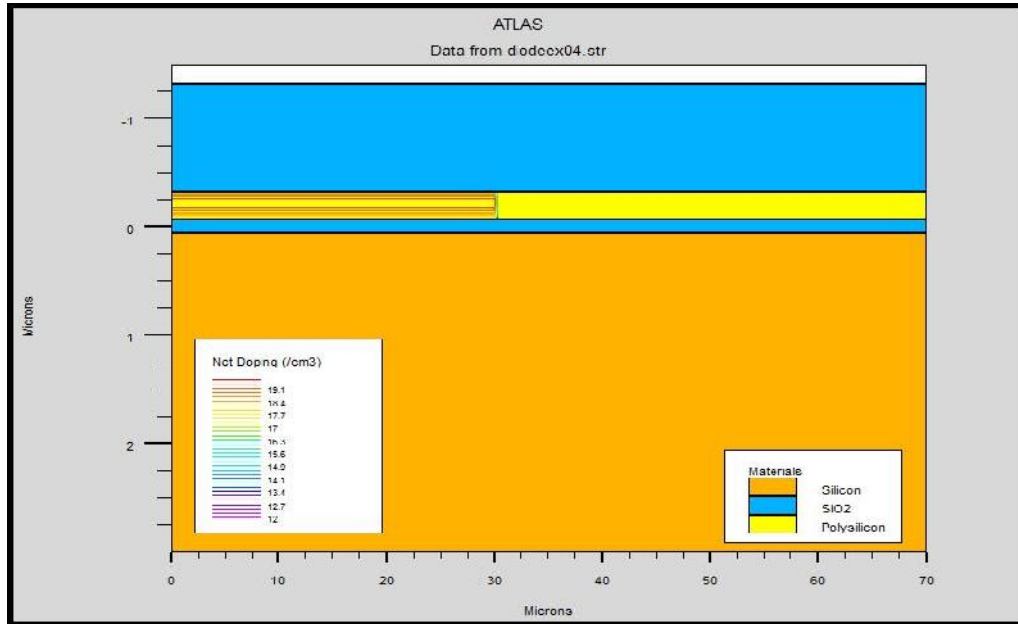


Figure III.8. Oxydation humide.

### III.3.6 Ouverture d'une fenêtre dans l'oxyde.

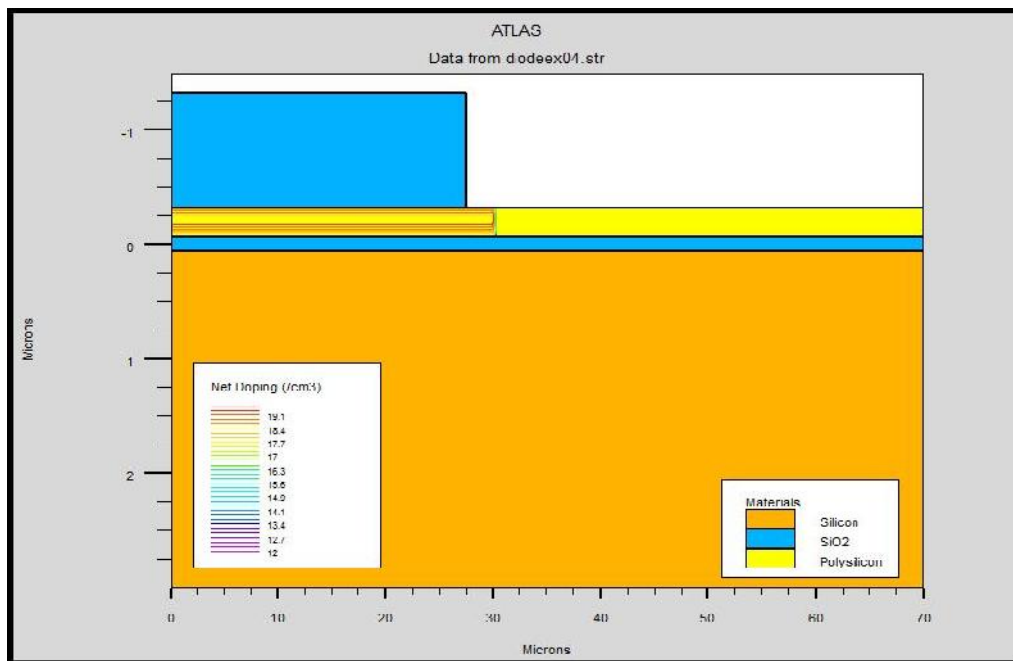


Figure III.9. Ouverture d'une fenêtre.

### III.3.7 Implantation ionique de phosphore avec recuit

Nous procédons de la même façon pour le phosphore, une ouverture de fenêtre pour implanter le phosphore a une énergie de 80Kev et une dose de  $4.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ .

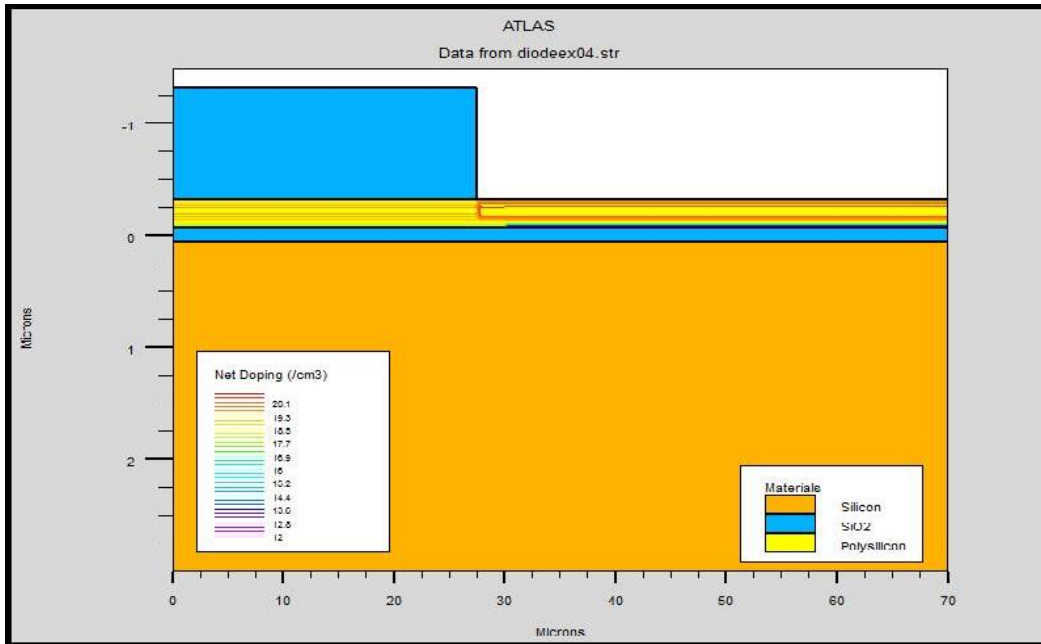


Figure III.10. Implantation ionique de phosphore.

La figure III.11 montre le profil de dopage après l'étape de redistribution des porteurs de charges durant le recuit, et elle montre la diminution de la concentration d'impuretés de Bore en surface.

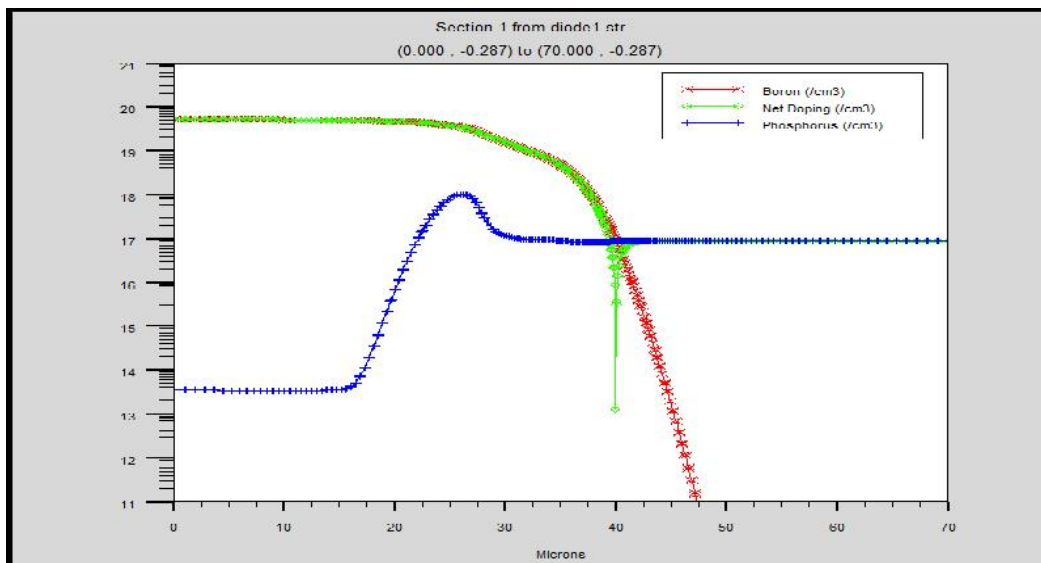


Figure III.11. Profil de dopage après l'étape de redistribution durant le recuit (1D).

### III.3.8 Métallisation

Les contacts métalliques du composant sont réalisés par un dépôt sur la surface avant du composant d'une couche d'aluminium avec une épaisseur de 0.1  $\mu\text{m}$ . Puis une opération de gravure est nécessaire pour enlever le métal des zones non désirées.

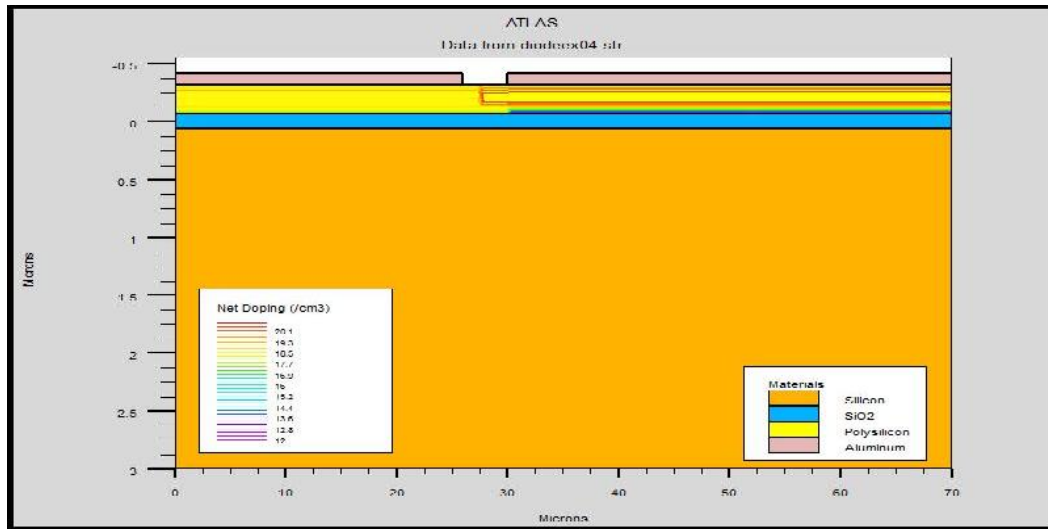


Figure III.12. Formation des contacts métalliques.

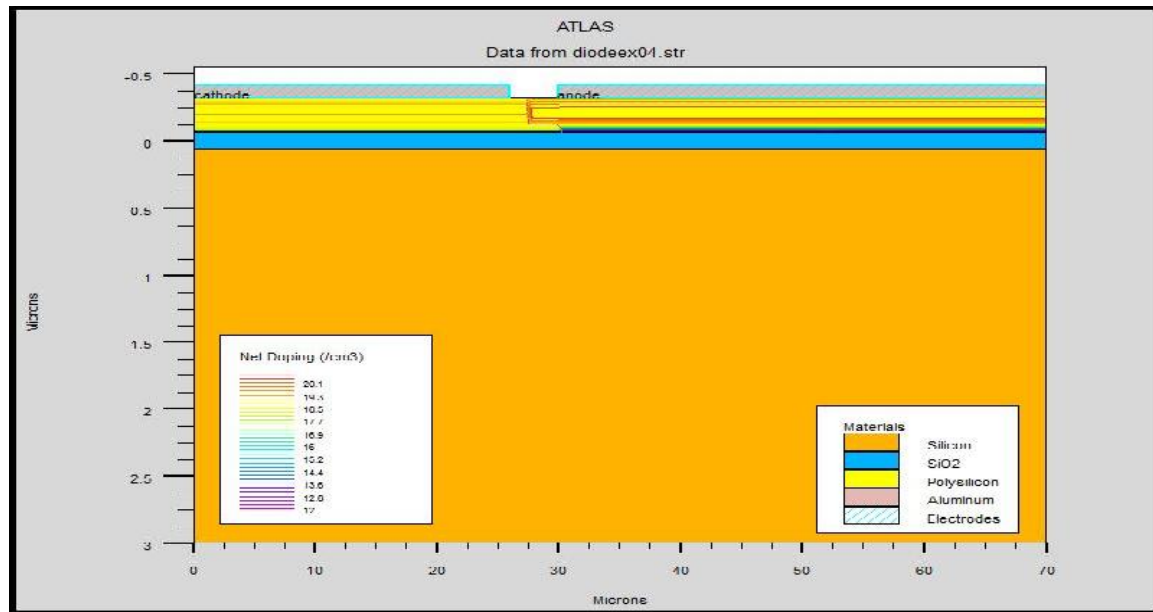
### III.3.9 Paramètres technologiques et géométriques du composant fini

En fin de ce chapitre, nous regroupant l'ensemble des paramètres de la diode réalisées sur silicium polycristallin suite à la simulation par ATHENA (Tableau III.2) et nous donnons la figure du dispositif fini (Figure III.13).

En ce qui concerne les paramètres technologiques, nous allons présenter une synthèse des caractéristiques du dispositif fini dans le tableau ci-dessous : le type et le dopage du substrat, le dopage des Anode et Cathode, l'épaisseur de l'oxyde, enfin l'épaisseur de la couche de métal (Aluminium) servant les électrodes.

Tableau III.2. Grandeurs optimales de la structure.

	Substat	Anode	Cathode	SiO <sub>2</sub>	polisilcon	Metallisation
<b>Orientation</b>	<b>100</b>					
<b>Epaisseur(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>3</b>			<b>0.12</b>	<b>0.25</b>	<b>0.1</b>
<b>Type</b>		<b>P<sup>+</sup></b>	<b>N</b>			
<b>Dose(<math>\text{cm}^{-2}</math>)</b>		<b><math>4 \cdot 10^{15}</math></b>	<b><math>4.5 \cdot 10^{14}</math></b>			
<b>Dopage(<math>\text{cm}^{-3}</math>)</b>		<b><math>1.6 \cdot 10^{22}</math></b>	<b><math>1.8 \cdot 10^{21}</math></b>			



**Figure III.13.** Structure finale du composante simulée sous ATHENA.

## Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modules de simulation ATHENA et ATLAS, l'environnement où est défini le programme de simulation (DECKBUILD), et l'outil de visualisation (TONYPLOT) du logiciel TCAD-SILVACO. Puis nous avons décrit les étapes de simulation du procédé technologique réalisé par le logiciel ATHENA, en présentant pour chaque étape technologique le modèle physique utilisé pour cette simulation. L'étude des profils de distribution des porteurs. Nous terminons ce chapitre en regroupant dans un tableau les principaux paramètres technologiques du dispositif simulé par ATHENA.

Le dernier chapitre présente les résultats de simulation et le calcul de quelques caractéristiques de la diode polycristalline.

# Chapitre IV

*Simulation et  
caractérisation de la  
diode polycristalline  
latérale*

## Introduction

Après une présentation de la diode de façon générale et la diode polycristalline, sujet de notre étude. Les modèles de conduction ont été éclaircis pour expliquer la variation des propriétés électriques des couches de silicium poly-cristallin en fonction de la concentration de dopant, de la température, du matériau dopant, de la taille des grains et des traitements thermiques avant et après dopage.

Afin de simuler les caractéristiques électriques de notre diode latérale à base de silicium polycristallin, On a besoin de spécifier les paramètres technologiques, du dispositif fini. Nous avons présenté une synthèse des caractéristiques de cette diode dans le chapitre précédent tel que : le type et le dopage du substrat, le dopage des Anode et Cathode, l'épaisseur de l'oxyde, enfin l'épaisseur de la couche de métal (Aluminium) servant comme électrodes.

Les étapes suivies pour simuler notre structure objet sont:

### IV.1 Les étapes de programmation

Après la présentation de la chaîne progicielle TCAD de SILVACO (chapitre III), sa structure interne et le fonctionnement d'ATLAS nous allons présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation Atlas. Ainsi, nous avons dit qu'il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement. Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparait et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte.

**Tableau IV.1.** Groupes de commandes.

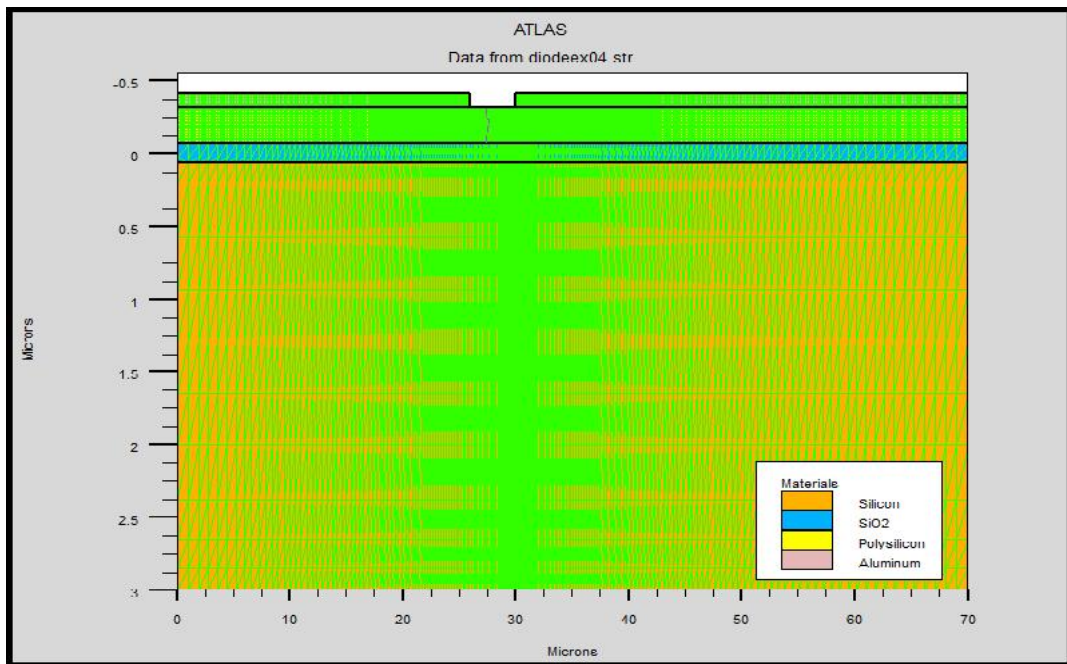
<p><b>1- Spécification de la structure</b></p> <p>Maillage</p> <p>Région</p> <p>Electrode</p> <p>Dopage</p>
<p><b>2- Spécification des matériaux et des modèles</b></p> <p>Matériaux</p> <p>Modèles</p> <p>Contact</p> <p>Interface</p>

<b>3- Sélection des méthodes numériques</b>
<b>4- Sélection des paramètres à extraire</b> Log Solve Load Save
<b>5- Analyse des résultats</b> Extract Tonyplot

### IV.1.1 Spécification de la structure

#### IV.1.1.1 Maillage

Le maillage est choisi de telle sorte qu'il soit serré au voisinage de la jonction et relâché ailleurs.



**FigureIV.1.** Maillage à deux dimensions(x,y).

#### IV.1.1.2 Les régions de la jonction

Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions dont le format est le suivant :

Région nombre=<intègre><matériel type>/<position des paramètres>

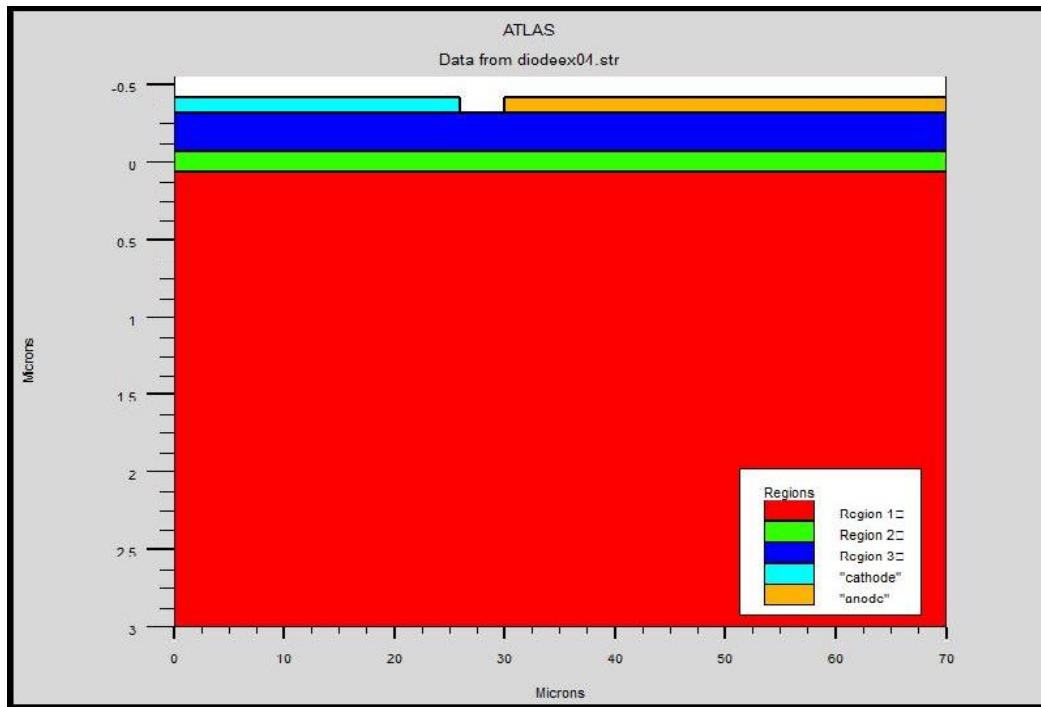


Figure IV.2. Définition des régions.

#### IV.1.1.3 Les électrodes

Atlas à un élamite de 50 électrodes qui peuvent être définies. Le format de définition des électrodes est comme suit :

Electrode Name=<nom de l'électrode><position des paramètres>

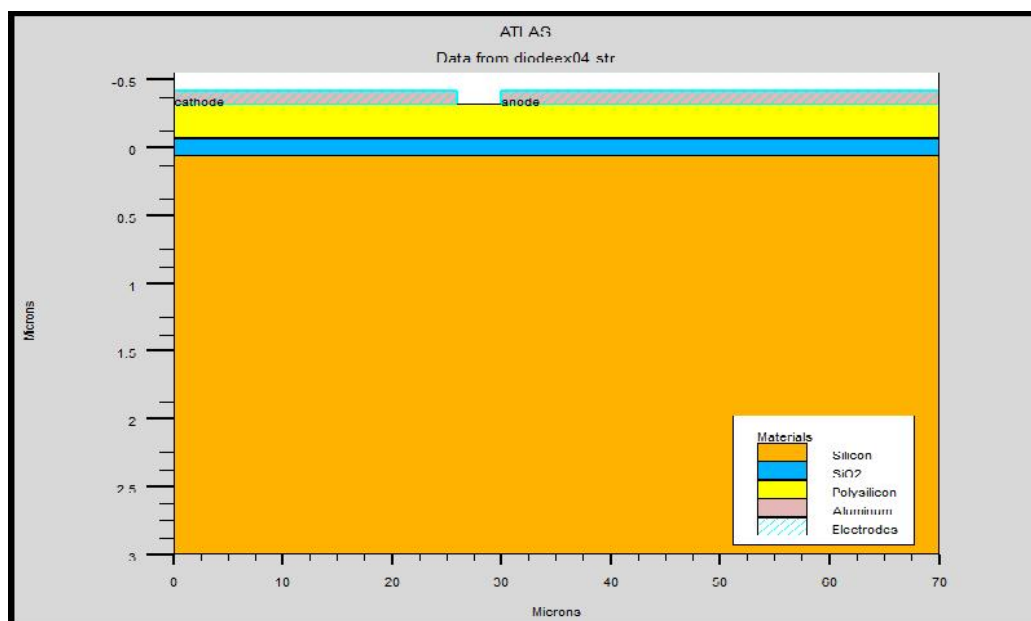


Figure IV.3. Dépotes électrodes.

#### IV.1.1.4 Le dopage

Le dernier aspect de la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage. Le format de la déclaration de dopage dans Atlas se présente comme suit:

DOPAGE<type de distribution><type de dopant>/<position des paramètres>.

Le dopage peut être de type N ou P. Le type de distribution peut être uniforme ou gaussienne.

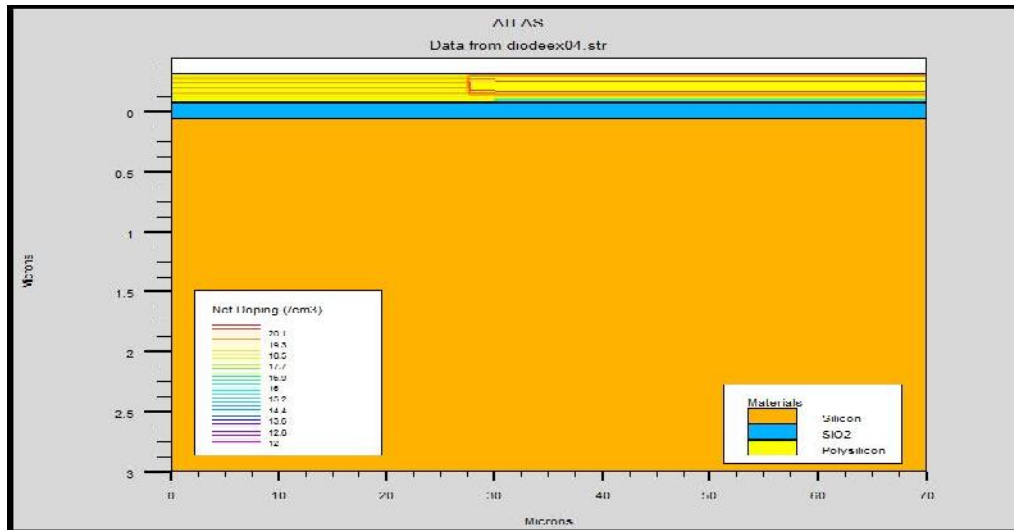


Figure IV.4. Type de dopage.

### IV.2.2 Spécification des matériaux et des modèles

#### IV.2.2.1 Le matériau

Le format de la déclaration d'un matériau est le suivant:

MATERIAL<localisation><définition du matériau>

Plusieurs autres paramètres peuvent être définis par la déclaration «Matériel».

#### IV.2.2.2 Modèles physiques

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. La syntaxe de la déclaration du modèle est la suivante :

MODEL<paramètres générales>/<paramètres du modèle>

### IV.2.2.3 Le contact

Le contact détermine les attributions des électrodes .La syntaxe du contact est la suivante:

contact nombre=<n>|NOM=<ename>| ALL

### IV.2.2.4 L'interface

Les limites du semi-conducteur ou de l'isolant sont déterminées dans la déclaration d'interface. La syntaxe est la suivante :

INTERFACE [<paramètres>]

## IV.2.3 Sélection des méthodes numériques

Après la précision du modèle de matériaux, la sélection de la méthode numérique doit être indiquée. Par mille différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équation, trois types de techniques sont utilisées dans «Silvaco-Atlas»:

- Méthode de GUMMEL
- Méthode de NEWTON
- Méthode de BLOCK

## IV.2.4 Spécification de Solution

### IV.2.4.1 Log

L'instruction Log enregistre toutes les caractéristiques finales de simulation dans un fichier de données. N'importe quel type de données , générées par la commande SOLVE est sauvé après la commande LOG. Si dans le programme il y a plusieurs commandes LOG, chaque fois le fichier log qui a été ouvert avant est fermé un nouveau fichier log est ouvert.

### IV.2.4.2 Solve (Résoudre)

L'instruction SOLVE suit l'instruction LOG. Elle effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.

### IV.2.4.3 Load et Save (chargement et sauvegarde)

L'instruction LOAD introduit, à partir d'un fichier existant, pour chaque point de polarisation les solutions précédentes tant que proposition initiale.

L'instruction SAVE permet l'enregistrement de toutes les informations obtenues pour un nœud dans un fichier de sortie.

### IV.2.5 Analyse des résultats

EXTRACT: Les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou structure.

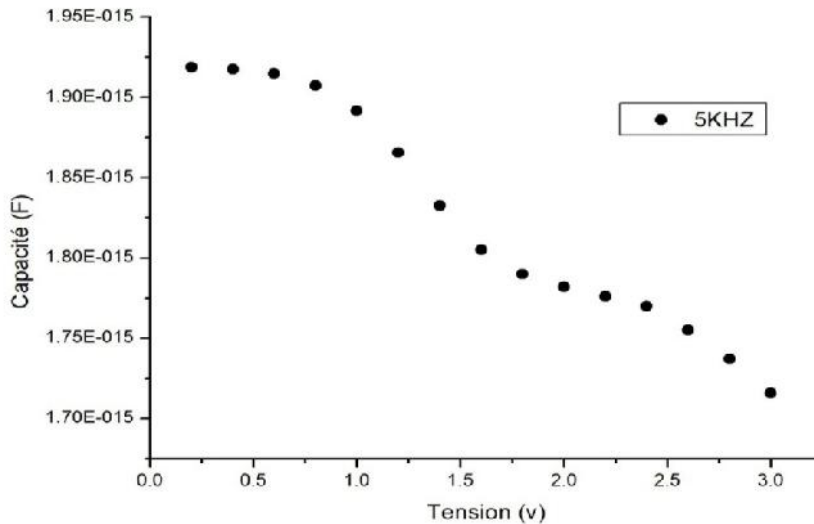
TONYPLOT: Les résultats et les informations obtenues par la simulation peuvent être affichés graphiquement avec tonyplot après exécution de chaque instruction.

## IV.3 Simulation des caractéristiques électriques de la diode latérale

### IV.3.1 Caractéristique capacité-tension inverse

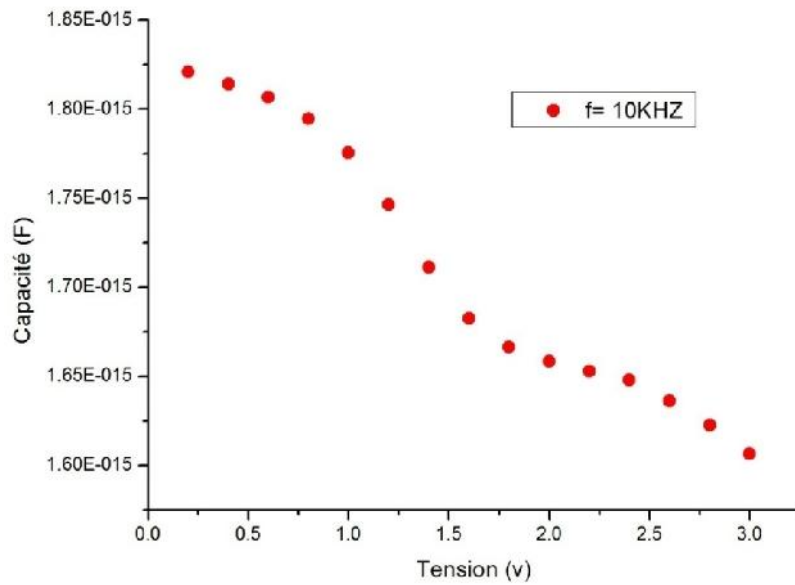
Après exécution du programme élaboré sous SILVACO et un choix judicieux des instructions, les résultats  $C(V)$  obtenus après simulation pour des différentes fréquences de la diode polycristalline sont présentés par les figures ci-dessous. Dans notre étude nous avons choisi quelques fréquences. Les simulation ont montrés que lorsque j'utilise des fréquences élevées la caractéristique  $C(v)$  change complètement montrant que la diode polycristalline étudiée ne peut être exploitée qu'en basse fréquence. Nous avons trouvé que la caractéristique  $C(v)$  montre une bonne allure identique à ceux dans la littérature pour les basses fréquences.

La caractéristique  $C(V)$  pour une fréquence  $f = 5\text{KHz}$  et des tensions négatives (sens inverse) est donnée par la figure (IV.5) ci-dessous.



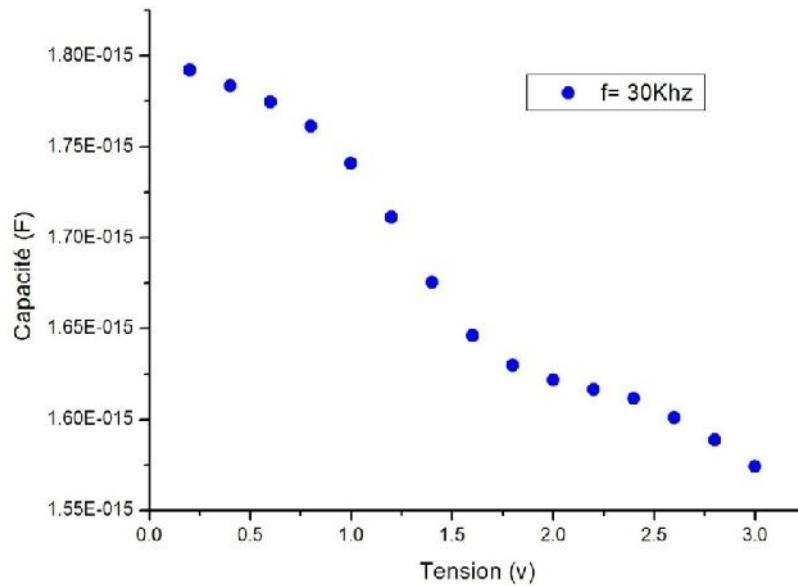
**Figure IV.5.** Caractéristique capacité-tension pour une fréquence  $f = 5\text{KHz}$ .

La caractéristique  $C(V)$  pour une fréquence  $f = 10\text{KHz}$  et des tensions négatives (sens inverse) est donnée par la figure (IV.6) ci-dessous.



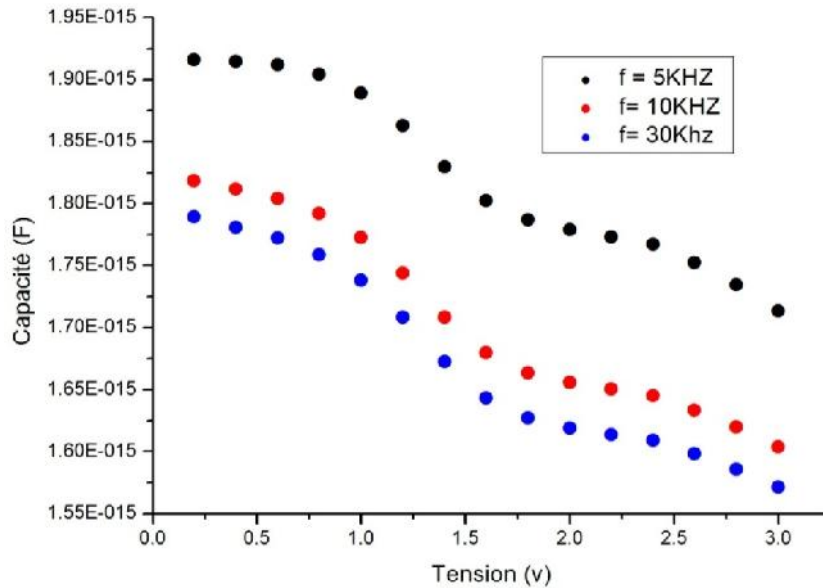
**Figure IV.6.** Caractéristique capacité-tension pour une fréquence  $f = 10\text{KHz}$ .

De la même façon pour la fréquence  $f = 30\text{KHz}$  la courbe obtenue après simulation est donnée par la figure (IV.7) ci-dessous.



**Figure IV.7** Caractéristique capacité-tension pour une fréquence  $f=30\text{KHz}$ .

Les caractéristiques  $C(V)$  des différentes fréquences sont regroupés dans la figure (IV.8) ci-dessous pour un éventuel analyse.



**Figure IV.8.** Caractéristique capacité-tension pour des différentes fréquences.

L'analyse des caractéristiques nous a permis d'observer plusieurs phénomènes intéressants, notamment la cassure des courbes  $C(V)$ . Cette cassure donne des information sur certains paramètres du matériau, telle que la concentration des pièges et la hauteur des barrières de potentiel aux joints de grain. D'après ces trois courbes on remarque bien que : chaque fois qu'on a augmenté la fréquence  $f$ ; la capacité  $C(v)$  (la capacité en fonction de la tension) diminue. C'est-à-dire que l'augmentation de la fréquence influe inversement sur la capacité  $C(V)$ . On remarque que les courbes de la capacité trouve à la tension  $U = 1.75V$  une cassure ou bien une la courbure divisant la courbe en deux segments.

Dans notre cas nous avons appliquée trois méthodes différentes celle de Gummel et de Newton et BLOCK. Le programme est fait de telle sorte qu'il combine ces trois méthodes et il choisit celle qui donne la meilleur optimisation avec une convergence rapide.



Application numérique :

Connaissant la valeur du gradient de concentration de dopant et pour une pente:

$$a = 7 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-4}$$

$$W = \frac{2 \cdot 10^{20} - 2 \times 10^{16}}{7 \cdot 10^{23}}$$

$$W = 2,857 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

$$W = 2,857 \text{ } \mu\text{m}$$

### 2) La ZCE aux joint de grain $W_{GB}$ :

Pour des grains de taille moyenne,  $L=150 \text{ nm}$ , la largeur de la zone de charge d'espace aux joints de grain est donnée par la relation ci-dessous

$$W_{GB} = L - W \dots \dots \dots (IV. 2)$$

$L$  = La taille moyenne de joint de grain

$$L = 150 \text{ nm}$$

Application numérique :

$$W_{GB} = 2,857 - 0,15$$

$$|W_{GB}| = 2,707 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

$$W_{GB} = 2,707 \mu\text{m}$$

### 3) La tension de diffusion $V_d$ :

$$V_d = \frac{2 \cdot KT}{q} \cdot \ln \frac{a \cdot W}{2n_i} \dots \dots \dots (IV. 3)$$

$K$  : constante de Boltzmann =  $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

$T$  : température absolue =  $300^\circ\text{K}$

$q$  : la charge d'électron =  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

$$\frac{KT}{q} = 26 \text{ mV}$$

$$n_i = 5,7 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

Application numérique :

$$V_d = 0.026 \cdot \ln \frac{7 \cdot 10^{23} \times 2,857 \cdot 10^{-4}}{2 \times 5,7 \cdot 10^{10}}$$

$$V_d = 0,55 \text{ V}$$

**4) Densité de pièges :**

D'après Seto la densité de pièges est donnée par

$$N_T = W_{GB} \cdot 2N_A \dots \dots \dots (IV.4)$$

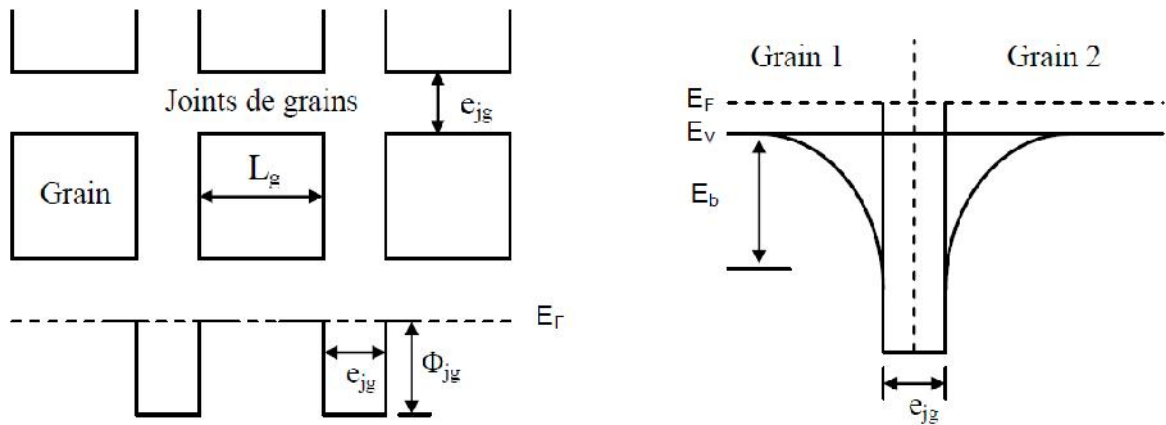
Application numérique :

$$N_T = 2,707 \cdot 10^{-4} \times 2 \times 2 \cdot 10^{16}$$

$$N_T = 1,0828 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

**5) La hauteur de barrières aux joint de grain :**

La détermination de la hauteur aux joint de grain est éclaircit par un schéma explicatif (figure IV.10).



**figure IV.10.** Barrière de potentiel aux joints de grains du polysilicium.

$$\phi_{Bn} = \frac{q^2 \cdot N_T^2}{8 \cdot N_D} \dots \dots \dots (IV.5)$$

$$\epsilon = 11,9 \times 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$$

Application numérique :

$$\phi_{Bn} = \frac{(1,60 \cdot 10^{-19})^2 \times (1,0828 \times 10^{13})^2}{8 \times 11,9 \times 8,85 \cdot 10^{-14} \times 10^{20}}$$

$$\phi_{Bn} = 3,5625 \times 10^{-21} \text{ eV}$$

Il est clair que les électrons doivent surmonter cette barrière par une émission thermoïonique.

## Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé le comportement de la capacité d'une jonction PN latérale en fonction de la tension c.à.d.  $C(v)$  en utilisant le simulateur ATLAS de SILVACO. La représentation  $C(v)$  des résultats de simulation obtenus ont montré des courbes divisées en deux segments à la tension 1.75V, pour les trois fréquences utilisées. donnant des informations sur certains paramètres du matériau, telle que la concentration des pièges et la hauteur des barrières de potentiel aux joints de grain. La valeur de la capacité  $C(v)$  change inversement avec la fréquence.

Enfin, nous avons exploité les relations théoriques de la jonction graduelle on peut obtenir quelques paramètres caractérisant la diode polycristalline latérale) tels que la largeur de la zone de charge d'espace, densité de piège, ...etc.

*Conclusion*

*Générale*

## **Conclusion Générale**

Au cours de ce travail, nous nous sommes intéressés aux diodes à jonction latérale PN à base du silicium polycristallin déposées par la technique de composition chimique en phase vapeur à basse pression (L.P.C.V.D) et donné une interprétation des phénomènes de conduction mis en jeu dans ces dernières. Pour la réalisation, et la simulation de ce genre de diodes nous étions obligés d'expliquer le procédé de fabrication adapté aux couches minces de silicium polycristallin.

Nous avons été amenés à choisir les paramètres des différentes étapes technologiques du procédé (doses et énergie des différentes implantations, épaisseurs d'oxyde de silicium, etc.).

Une explication exhaustive de l'outil SILVACO a été investi, par la suite nous avons exploité ce dernier pour montrer les différentes étapes technologiques afin de tracer les caractéristiques  $C(V)$  en inverse pour des différentes fréquences.

Le calcul de quelques paramètres lié aux grain et joins de grain c'est montré primordial pour comprendre le comportement des composants à base du silicium polycristallin.

# *Bibliographies*

---

## Références bibliographiques

- [1] A. Souici, “*Physique des Semi-conducteurs*”, Cours de l'université de Béjaia, Algérie, (2013-2014).
- [2] A. Bensaada, “*Technologie des semi-conducteurs*”, Livre, Université d’Oran, Alger.
- [3] F. baccar el boubkari. “*Evaluation des mécanismes de défaillance et de la fiabilité d’une nouvelle terminaison haute tension : approche expérimentale et modélisation associée*”, Thèse de doctorat, université de bordeaux, 1 décembre 2015.
- [4] S. M. Sze, “*Physics of Semiconductor Devices*”, Wiley Interscience, New York, 1981
- [5] Van Overstraeten, R. J. et R. P. Mertens, “*Solid State Electron*”. 30, 1077- 1087, (1987)
- [6] A. Chovet et P. Planson, “*Physiques des semi-conducteurs*”, Cours de l’école polytechnique universitaire de Marseille, (2004).
- [7] L. Lasne, “*Physique et technologie des composants de puissance*”, de Bordeaux, 2001.
- [8] Ecole nationale supérieure polytechnique “*dispositifs et circuits micro-onde*”, Cours de l'université de yaounde I.
- [9] “Les semi-conducteurs”, Cours de l'université du maine, [En ligne]. Available: [http://ressources.univ\\_lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/cours\\_elec/semicon.pdf](http://ressources.univ_lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/cours_elec/semicon.pdf)
- [10] «Diodes a jonction,» Cours de l'universitaire de Brive-La-Gaillarde-Limoges, [Enligne].Available.[https://www.brive.umilim..fr/files/fichiers/quere/Elec\\_phys/CHAP\\_2.pdf](https://www.brive.umilim..fr/files/fichiers/quere/Elec_phys/CHAP_2.pdf)
- [11] Site web / [www.univ-lemans.fr](http://www.univ-lemans.fr)
- [12] S. M. Sze « *Physics of Semiconductor Device* », (2nd edition) Wiley Inter-Science, 1981.
- [13] <http://jas.eng.buffaloe du /éducation /fab /PN /diode frame .html>
- [14] A. Goetzberger, J. Knobloch, B. Voss, “*Crystalline silicon solar cells*”, Wiley England, (1998).

- 
- [15] P. Munster, Thèse de doctorat d'état, Université de Rennes I (2001).
- [16] O. Bonnaud, "silicium intrinsèque et dopé in situ déposé amorphe par sapcvd puis cristallisé en phase solide", Thèse de doctorat, Université DE RENNES 1, 17 juillet 2001.
- [17] J. Levinson et al. "Conductivity behavior in polycrystalline semiconductor thin film transistor" Journal of Applied Physics, 1982, Vol. 53 p 1193-1202.
- [18] J. Y. Seto, "The electrical properties of polycrystalline silicon films", Journal of Applied Physics, Vol. 46 p 5247-5254, 1975.
- [19] A. khaled, "elaboration de nouvelles phases de silicium en couches minces", Thèse de magister, université mentouri Constantine, Algérie, 02 / 07 / 2008.
- [20] M. Lemiti, S. Audisio, C. C. Mai et B. Balland, "Evolution de la taille des grains du silicium polycristallin pendant des traitements thermiques ou oxydation", Revue Phys. Appl. 133, (1989).
- [21] L. Mei, M. Rivier, Y. Kwark, R.w. Dutton "Grain-Growth mechanisms in polysilicon", journal of the electrochemical society, 129, (1982).
- [22] G. Harbeke, L. Krausbauer, E. F. Steigmeier, A. E. Widmer, H. F. Kappert, G. Neugebauer, "Growth and physical properties of LPCVD polycrystalline silicon films", J. Electrochem. Soc., 131, 675, (1984).
- [23] N C C. Lu, C Y, M K. Lee, C C. Shih, C S. Wang, W. Reuter, T. T. Sheng. "The Effect of film Thickness on the Electrical Properties of LPCVD polysilicon Films", J. Electrochem. Soc., 131, 897, (1984).
- [24] J. Minota, Journal of applied Physics, 53, 3702 (1982).
- [25] H. J. Moller, "Semiconductors For Solar Celles", Artech House. Inc. Norwood, MA (1993).
- [26] A. B. Sproul, S. A. Edrington, T. Puzzer, G Heiser. S. R. Wenham, M. A Green Proc 25th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington, USA, May 1996.
- [27] S. Bourdais, "Etude du dépôt et des propriétés du silicium poly-cristallin obtenu par le procédé RTCVD sur substrats de mullite. Application aux cellules photovoltaïques en couches minces", Thèse de doctorat, Université Louis pasteur, Strasbourg, (1999).
-

- 
- [28] A. Zerga, “*Caractérisation, modélisation et simulation numérique des cellules photovoltaïques à bases de silicium poly-cristallin en couche minces déposées par RTCVD*”, Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, (2005).
- [29] H. E. Ghitani, M. Pasquinelli, S. Martinuzzi, “ *Influence of dislocations on photovoltaic properties of multicrystalline silicon solar cells*”, *Jornal de Physique III3*, 19, 41, (1993).
- [30] Cornwell et al, *Solid –State Electronics*, 9, 3035, (1966)
- [31] P. J. French, “ *Poly-silicon: a versatile material for Microsystems* ”, *Sensors and Actuators*, 99, 3, (2002)
- [32] E. Couderc, “*Etude de dépôts de silicium dopé azote Sin obtenus par LPCVD à partir du mélange Si<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/NH<sub>3</sub>*”, Rapport de stage effectué au LAAS du CNRS -Toulouse. Année 1998-1999.
- [33] K. Nakazawa, *J. Appl. Phys.* 69 (3), 1 Février (1991), p. 1703.
- [34] M. Guendouz, “*Cristallisation thermique en phase solide du silicium amorphe, déposé par LPCVD : effet du substrat*”. Thèse de Doctorat rennes I- France 7 décembre (1990).
- [35] M. E. Cowher, T. O. Sedgwick, “ *Chemical vapor deposited polycrystalline silicon*”, *J. Electrochem. Soc.*, 119, 1565, (1972).
- [36] T. I. Kamins, “*Hall mobility in chemically deposited polycrystalline silicon*”, *J. Appl. Phys.*, 42, 43, 57, (1971).
- [37] J. Y. W. Seto, “*The electrical properties of polycrystalline silicon*”, *J. Appl. Phys.*, 46, 47, 52, (1975).
- [38] K. Bessem, “ *Etude par TCAD-silvaco d’une structure MOS pour la réalisation de capteurs ISFET paramètres technologiques et électrique* ”, Mémoire magister, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [39] J.Gallièrè, J.Boch, “*mise en oeuvre de la simulation mixte électrique /TCAD pour décroisonner l’enseignement de la microélectronique* ”, Université de Montpellier II, p.15, 2008.
- [40] P. Henry, “*Guide to Using TCAD with Examples Silvaco* ”, 2009.
-

- [41] Silvaco International, [http://www.silvaco.com/products/device\\_simulation/atlas.html](http://www.silvaco.com/products/device_simulation/atlas.html).
- [42] H. Michael, “ *Modeling of opérating température performance of triple junction solar cells using silvaco ‘s ATLAS ’*”, Naval School California, 2001.

## Résumé

L'objectif de notre travail est d'étudier l'effet capacitif d'une diode latérale et voir le comportement de la caractéristique  $C(V)$  (sous polarisation inverse) des jonctions PN polycristallines. L'exploitation exhaustive des relations théoriques pour une jonction graduelle nous a permis de caractériser la diode polycristalline. On donne une importance majeure pour quelques paramètres très utiles pour connaître des informations sur les grains et les joints de grain. Ainsi nous avons pris en charge quelques caractéristiques électriques de la diode latérale. Pour cela nous avons opté un environnement de simulation approprié SILVACO pour la simulation des étapes technologiques de cette diode polycristalline, tenant compte au préalable des paramètres qui la caractérise, puis donner les modèles physiques adéquats qui peuvent donner la capacité de la jonction PN latérale au silicium polycristalline à des différentes fréquences, sous le même environnement.

**Mots clés :** Diode latérale, Polycristalline, Capacité, SILVACO.

### ملخص

إن الهدف من عملنا هو دراسة العلاقات النظرية للوصلة التدريجية بوصف الصمام الثنائي الجانبي polycristalline المفيدة لمعرفة الحبوب و حدود الحبوب. لذلك درسنا بعض الخصائص الكهربائية من الصمام الثنائي الجانبي. لهذا SILVACO لمحاكاة الخطوات التكنولوجية للصمام الثنائي polycristalline. النموذج الفيزيائي المناسب الذي يمكن أن يعطي تقاطع PN بوليكرستالين: الكلمات المفتاحية:

### Abstract

The objective of our work is to study the capacitive effect of a lateral diode and see the behavior of the characteristic  $C(V)$  (in reverse bias) polycrystalline PN junctions. The comprehensive use of theoretical relationships for a gradual junction has allowed us to characterize the polycrystalline diode. It gave a major importance for some useful parameters to know information on grains and grain boundaries. So we supported some electrical characteristics of the lateral diode. For this we chose an appropriate simulation environment SILVACO for simulation of technological steps that polycrystalline diode, taking into account prior parameter that characterizes it, then give the appropriate physical models that can give the ability to the side PN junction silicon polycrystalline at different frequencies, under the same environment.

**Key words:** Lateral diode, Polycrystalline, Capacitor, SILVACO.