

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abdelhamid Ben Badis - Mostaganem
Faculté des Sciences Exactes et de l'Informatique



Rapport de Stage

Présenté en vue d'obtenir le diplôme de MASTER

SPECIALITE : physique des matériaux

Elaboré par

Mohammed Bey Fatiha

*Etude comparative entre deux cellules solaires à émetteurs réalisés
par diffusion thermique et par implantation ionique.*

Encadré par

BEGHDAD Mohammed

M. BEGHDAD Mohammed,

Encadreur

Année universitaire

2017 - 2018

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes très chers parents qui m'ont toujours soutenu dans les bons et les mauvais moments de ma vie que dieu leur prête bonheur.

A mes frères et sœurs.

A toute ma belle famille

Remerciements

- *Je remercie en premier lieu notre ALLAH le tout puissant de m'avoir accordé la volonté et la puissance pour terminer ce travail.*
- *Je tiens remercier Monsieur **Mohammed BEGHADAD**, Maître de Conférences classe A, mon encadreur pour son aide, ses conseils et ses encouragements pour mener ce travail.*
- *Je tiens à remercier les membres de jury pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant d'évaluer mon travail.*
- *Enfin, je suis particulièrement reconnaissante à mes parents, mes sœurs, mes frères, et toute ma famille.*

Liste des figures

Figure N°	Titre de la figure	Page
Figure 1-1	Structure du soleil	9
Figure 1-2	la constante solaire	9
Figure 1-3	Différentes composantes du rayonnement solaire	12
Figure 1-4	Effet de l'énergie lumineuse sur les différentes bandes interdites	13
Figure 1-5	Création de paires électron-trou	13
Figure 1-6	Diagramme des longueurs d'onde absorbée par les semi-conducteurs	14
Figure 1-7	Définition de l'Air Masse	14
Figure 1-8	Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5	15
Figure 2-1	Résistivité pour différents types de matériaux	17
Figure 2-2	Tableau périodique partiel	17
Figure 2-3	Diagrammes des bandes d'énergie dans différents types de matériaux	18
Figure 2-4	Evolution de l'énergie de gap pour le Si, le Ge et le GaAs en fonction de la Température	19
Figure 2-5	Structure cristalline du Si	20
Figure 2-6	L'évolution des densités d'états dans la bande de conduction et dans la bande de valence pour les semi-conducteurs	22
Figure 2-7	Evolution de la concentration intrinsèque pour le Si, le Ge et le GaAs . a. En fonction de la Température. b. En fonction de l'inverse de la température.	23
Figure 2-8	Niveau de Fermi dans un semi-conducteur intrinsèque	24

Figure 2-9	Dopage du semi-conducteur (Type N)	25
Figure 2-10	Niveau « donneur » dans la Bande Interdite	25
Figure 2-11	Dopage du semi-conducteur (Type P)	26
Figure 2-12	Niveau « accepteur » dans la Bande Interdite	26
Figure 2-13	Variation de coefficient de diffusion en fonction du dopage.	29
Figure 2-14	La loi de Beer-Lambert	31
Figure 2-15	Coefficient d'absorption des différents semi-conducteurs à 300 °K en fonction longueur d'onde Variation de coefficient d'absorption et profondeur d'absorption en fonction de la longueur d'onde .	31
Figure 2-16	Variation de coefficient d'absorption et profondeur d'absorption en fonction de la longueur d'onde .	32
Figure 2-17	Schéma des principaux processus de recombinaison dans un semi-conducteur	33
Figure 2-18	La zone de charge d'espace	38
Figure 2-19	Représentation d'une jonction PN à L'équilibre thermodynamique	39
Figure 2-20	Coupe transversale d'une jonction PN	39
Figure 2-21	Polarisation inverse	40
Figure 2-22	Polarisation direct	40
Figure 2-23	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	41
Figure 2-24	Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire idéale	42
Figure 2-25	Schéma électrique équivalent d'un cellule photovoltaïque réelle.	42
Figure 2-26	Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairage et sous obscurité	44
Figure 2-27	Configuration des trois mesures à réaliser pour déterminer la	48

	résistivité de Contact	
Figure 2-28	Variation de résistivité en fonction de la concentration du dopage	49
Figure 2-29	Composition d'une cellule photovoltaïque	53
Figure 3-1	Coefficients de diffusion intrinsèque des principaux dopants utilisés en microélectronique : a. En fonction de la Température. b. En fonction de l'inverse de la température.	57
Figure 3-2	Principe de diffusion-système conservatif	58
Figure 3-3	Mécanisme de diffusion interstitiel	59
Figure 3-4	Mécanisme de diffusion substitutionnel	60
Figure 3-5	Les types des mécanismes substitutionnels	60
Figure 3-6	Profil de concentration en dopant pour différentes durées de la diffusion à C_S constant : a -Échelle logarithmique b -Échelle linéaire.	63
Figure 3-7	Diffusion dans un four à partir de sources gazeuses.	64
Figure 3-8	Diffusion à partir de sources liquides.	65
Figure 3-9	Procédé de dopage à partir de sources solides.	65
Figure 3-10	Schéma montrant les différents phénomènes pouvant se produire dans une cible soumise à l'implantation ionique	67
Figure 3-11	Schéma montrant le cristal avant et après recuit thermique	68
Figure 3-12	Schéma de principe d'un implantateur	69
Figure 3-13	Distribution des ions implantés dans une cible avec masque	70
Figure 3-14	Profondeur moyenne de pénétration R_p et écarts types axial et transverse de R_p	71
Figure 3-15	Distribution d'ions implantés à 200 KeV dans le silicium	73
Figure 3-16	Distribution d'ions implantés à dose 10^{15} cm^{-2} dans le silicium	73
Figure 4-1	Variation du dopage en fonction de l'épaisseur de l'émetteur réalisé par diffusion thermique	81
Figure 4-2	Variation du dopage en fonction de l'épaisseur de l'émetteur	82

	réalisé par implantation ionique	
Figure 4-3	Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique pour cellule diffusé	83
Figure 4-4	Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique pour cellule implanté	84
Figure 4-5	Schéma de la structure avec les paramètres initiaux de la cellule solaire étudiée	86
Figure 4-6	Caractéristiques de la cellule solaire simulée	87
Figure 4-7	Comparaison des rendements quantiques interne des deux cellules	88
Figure 4-8	Variation du courant de court-circuit en fonction de la durée de vie de la base.	89
Figure 4-9	Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de la durée de vie de la base.	89
Figure 4-10	Variation du facteur de forme en fonction de la durée de vie de la base.	90
Figure 4-11	Variation le rendement en fonction de la durée de vie de la base.	91
Figure 4-12	Courbes obtenues par Cho et al.	92
Figure 4-13	Variation du courant de court-circuit en fonction de la résistivité de la base	93
Figure 4-14	Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de la résistivité de la base	94
Figure 4-15	Variation du facteur de forme en fonction de la résistivité de la base	94
Figure 4-16	Variation le rendement en fonction de la résistivité de la base	95
Figure 4-17	Variation du courant de court-circuit en fonction de l'épaisseur de la base	95
Figure 4-18	Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de l'épaisseur de la base	96
Figure 4-19	Variation du facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la base	96
Figure 4-20	Variation le rendement en fonction de l'épaisseur de la base	97

Liste des tableaux

Tableau N°	Titre du tableau	Page
Tableau 1	Caractéristiques principales du soleil	8
Tableau 2	Quelques valeurs des coefficients du trouble atmosphérique	10
Tableau 3	Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude	11
Tableau 4	La valeur du gap de quelques semi-conducteurs	18
Tableau 5	Coefficients de l'énergie du gap	19
Tableau 6	La densité effective d'états des électrons et la densité effective d'états des trous de quelques semi-conducteurs	21
Tableau 7	La densité des porteurs intrinsèques de quelques semi-conducteurs	24
Tableau 8	Mobilités des électrons et des trous pour quelques semi-conducteurs	28
Tableau 9	Le coefficient de la recombinaison radiative B	35
Tableau 10	Différentes CAR utilisées en photovoltaïque : TiO ₂ , SiO ₂ , ZnS, MgF ₂ , SiN _x	51
Tableau 11	Valeurs typiques du coefficient de diffusion et d'énergie d'activation pour les dopants de silicium les plus fréquents	56
Tableau 12	Résolution des équations de Fick dans le cas d'une source infinie de dopants	61
Tableau 13	Résolution des équations de Fick dans le cas d'une source constante de dopants	62
Tableau 14	La valeur de la résistance carrée des deux cellules (Cho & al_2016 calculs)	82
Tableau 15	Les différents paramètres initiaux de simulation de la cellule étudiée (et al, 2016)	85
Tableau 16	Résultats des deux cellules (Cho & al_2016 et simulée)	53

Liste des abréviations

Abréviation	Expression Complète	Page
AM	Air Mass	
B	Constante de la recombinaison radiative	
BSF	Back Surface Field (Champ de surface arrière)	
C_n et C_p	Coefficients de capture d'Auger respectivement de l'électron trou et de trou	
d_{CAR}	Epaisseur de la couche antireflet	
D_n, D_p	Constantes de diffusion respectivement des électrons et des trous	
$E (V \cdot m^{-1})$	Le champ électrique.	
$E_c(eV)$	L'énergie minimale de la bande de conduction	
$E_F(eV)$	Le niveau de Fermi	
$E_g(eV)$	Largeur de la bande interdite (gap)	
$E_i(eV)$	Le niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque	
$E_v(eV)$	L'énergie maximale de la bande de valence	
FF (%)	Le Facteur de forme	
$h (J \cdot s)$	La constante de Planck ($6,62 \times 10^{-34} Js$)	
$I_{cc}(mA/cm^2)$	Densité du courant de Court-Circuit	
$I_{max}(mA/cm^2)$	Densité du courant maximum de fonctionnement de la cellule solaire	
$I_{ph}(mA/cm^2)$	Densité du photo-courant	
$I_s(A/cm^2)$	Densité du courant de saturation	

$J_n, J_p (A/cm^2)$	Densité de courant des électrons et des trous respectivement	
\vec{K}	Vecteur d'onde	
$K_B (J.K^{-1})$	Constante de Boltzmann ($1,38.10^{-23}J.K^{-1}$)	
$m_e (kg)$	Masse effective de l'électron	
$m_h (kg)$	Masse effective du trou	
$n, p (cm^{-3})$	Concentration des électrons et des trous respectivement	
$n_i (cm^{-3})$	Concentration intrinsèque	
n_K	Indice de réfraction de la k ^{ième} couche	
$N_a, N_d (cm^{-3})$	Concentration des atomes accepteurs et des atomes donneurs respectivement	
q (C)	Charge de l'électron ($1,602.10^{-19}C$)	
RQE(%)	Rendement Quantique Externe, (External Quantum Efficiency : EQE)	
RQI (%)	Rendement Quantique Interne (Internal Quantum Efficiency : IQE)	
$R_{Auger} (cm^{-3}s^{-1})$	Taux de recombinaison Auger	
$R_{rad} (cm^{-3}s^{-1})$	Taux de recombinaison radiative	
$R_{SHR} (cm^{-3}s^{-1})$	Le taux de recombinaison Shockley-Hall-Read	
$R_s (%)$	La réponse spectrale	
$R_{sheet} (\Omega /carrée)$	la résistance carrée	
T (°K)	La température.	
$V_{CO} (V)$	Tension de circuit ouvert	
$V_{max} (V)$	Tension maximale	
$v_{th} (cm/s)$	La vitesse thermique	

$\tau_n, \tau_p (s)$	Durée de vie des électrons et des trous respectivement.	
$\tau_{Auger} (s)$	La durée de vie Auger	
$\tau_{SRH} (s)$	La durée de vie SRH	
$\tau_{Rad} (s)$	La durée de vie radiative	
$\mu_n, \mu_p (cm^2 V^{-1} s^{-1})$	Mobilité des électrons et des trous respectivement.	
$\phi (A/W)$	le flux des photons incidents	
$\rho (\Omega .cm)$	La résistivité	

Table des matières

Introduction Générale	5
Chapitre 1 L'enseillement.....	8
1.1 Introduction	8
1.2 Le soleil	8
1.3 La constante solaire	9
1.4 Le rayonnement solaire	10
1.5 Le type rayonnement	10
1.5.1 Le rayonnement direct.....	10
1.5.2 Le rayonnement diffus.....	11
1.5.3 Le rayonnement global.....	12
1.6 Le spectre du rayonnement solaire	12
1.7 La masse d'aire.....	14
Chapitre 2 physique des cellules solaires	16
2.1 Introduction	16
2.2 Semi-conducteur	16
2.3 Bandes d'énergie	17
2.4 Semi-conducteur intrinsèque.....	19
2.4 .1 cristal du silucium.....	20
2.4 .2 Concentration intrinsèque.....	20
2.5 Semi-conducteur extrinsèque	24
2.5 .1 Semi-conducteur dopé N	25
2.5 .2 Semi-conducteur dopé P	26
2.6 Densité de charges dans un semi-conducteur	27
2.7 Courant dans les semi-conducteurs	28
2.7.1 Courant de conduction	28
2.7.2 Courane de diffusion	29

2.8	La génération et recombinaison des paires électrons -trous.....	30
2.8.1	La génération	30
2.8.2	Recombinaison des paires électrons-trous	32
2.8.2.1	Recombinaison radiative	33
2.8.2.2	Recombinaison RSH.....	35
2.8.2.3	Recombinaison Auger	36
2.8.2.4	Recombinaison en surface	37
2.9	La jonction PN	38
2.9.1	La jonction PN polarisée en sens inverse	39
2.9.2	La jonction PN polarisée en sens direct	40
2.10	Description du principe de fonctionnement d'une cellule solaire	40
2.11	Modélisation d'une cellule photovoltaïque	41
2.11.1	Le modèle idéal	41
2.11.2	Le modèle réel	42
2.12	La caractéristique courant-tension	43
2.13	Paramètres de la cellule solaire	44
2.13.1	Courant de court-circuit I_{CC}	44
2.13.2	Tension à circuit-ouvert V_{CO}	44
2.13.3	Facteur de forme FF	45
2.13.4	Rendement η	46
2.13.5	La réponse spectrale et rendements quantiques	46
2.13.6	La résistance carrée	47
2.13.7	La résistivité	48
2.14	Pertes physiques et technologiques.....	49
2.14.1	Pertes physiques	49
2.14.1.1	Pertes par les photons de grande longueur d'onde	49
2.14.1.2	Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons	49
2.14.1.3	Facteur de tension	50
2.14.2	Pertes technologiques	50

2.14.2.1	Réfectivité.....	50
2.14.2.2	Taux d'ombrage.....	50
2.15	Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque	50
2.15.1	Passivation des faces avant et arrière	50
2.15.2	Couche antireflet.....	51
2.15.3	Texturation de la surface	52
2.15.4	Contacts face avant et arrière	52
2.15.5	Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field).....	53
Chapitre 3 Techniques de dopage		54
3.1	Introduction	54
3.2	La diffusion thermique	54
3.2.1	Historique	54
3.2.2	La diffusion dans le silicium.....	55
3.2.3	Les lois de Fick	55
3.2.4	Les mécanismes de diffusion.....	58
3.2.4.1	Le mécanisme interstitiel.....	58
3.2.4.2	Le mécanisme substitutionnel	59
3.2.5	Résolution des équations de Fick	61
3.2.6	Procédés de diffusion	64
3.3	L'implantation ionique.....	66
3.3.1	Historique	66
3.3.2	Les mécanismes l'implantation ionique	66
3.3.3	Le recuit thermique.....	67
3.3.4	Principe des implantateurs ioniques	68
3.3.5	Distribution des ions après implantation	69
3.3.6	Les inconvénients et les avantages de l'implantation ionique.....	74
Chapitre 3 Résultats de simulation et discussions		77
4.1	Le logiciel PC1D.....	77
4.2	Le fonctionnement de PC1D	77

4.2.1	Les paramètres du dispositif	77
4.2.2	Les paramètres des régions du dispositif.....	78
4.2.3	Les paramètres d'excitation.....	79
4.2.4	Les résultats	80
4.3	Présentation des paramètres utilisés dans la simulation.....	80
4.4	Etude et optimisation par simulation des cellules solaires	84
4.4.1	Paramètres de la simulation	84
4.4.2	Résultats et comparaison	87
4.4.3	Etude et validation des résultats des deux cellules	89
4.4.3.1	Effet de la durée de vie	89
	1 Etude du courant de court-circuit I_{cc}	89
	2 Etude de la tension de circuit ouvert V_{co}	90
	3 Etude du facteur de forme FF	90
	4 Etude rendement η	91
4.4.3.2	Effet de la résistivité	93
	1 Etude du courant de court-circuit I_{cc}	93
	2 Etude de la tension de circuit ouvert V_{co}	93
	3 Etude du facteur de forme FF	94
	4 Etude rendement η	95
4.4.3.3	Effet de l'épaisseur.....	95
	1 Etude du courant de court-circuit I_{cc}	95
	2 Etude de la tension de circuit ouvert V_{co}	96
	3 Etude du facteur de forme FF	96
	4 Etude rendement η	97
	Conclusion Générale.....	98
	Bibliographie.....	101

Introduction

La consommation mondiale en énergie est en constante augmentation. Les ressources étant limitées. Il faut optimiser les méthodes de conversion d'énergie. Pour cela les panneaux solaires sont une des solutions les plus prometteuses à l'heure actuelle dans le domaine des énergies renouvelables.

Les cellules solaires convertissent la lumière en électricité. Le rendement d'une cellule solaire est le rapport entre la quantité d'énergie électricité en sortie de la cellule et la quantité d'énergie apportée par les photons incidents qui arrivent à la surface de la cellule.

Durant ces dernières années, le marché du photovoltaïque (PV) s'est considérablement développé avec l'amélioration du rendement de conversion et la réduction des coûts de production due à la substitution du silicium (Si).

Le silicium est un matériau semi-conducteur c'est à dire un matériau intermédiaire entre l'isolant et le conducteur, il reste le matériau le plus utilisé dans la fabrication des cellules solaires. Cela est au vu des considérations économiques (faible coût) et technologique (meilleur comportement avec la température de croissance et de fonctionnement). Les cellules au silicium constituent 95% des panneaux photovoltaïque installés dans le monde.

Le Silicium est capable de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique à l'aide des technologies de dopage de type N et type P.

L'étape de dopage consiste à intégrer dans l'arrangement périodique du silicium, une infime concentration d'atomes issus de la colonne III (pour les accepteurs) ou de la colonne V (pour les donneurs) du tableau périodique. On cite parmi les dopants les plus utilisés le bore et l'arsenic puis le phosphore et l'indium.

Un dopage dans le domaine semi conducteur, est une impureté ajoutée en petites quantités à un matériau pur afin de modifier ses propriétés de conductivité.

Les propriétés des semi- conducteurs sont en grande partie régies par la quantité de porteurs de charge (électrons et trous) qu'ils contiennent. Les atomes dopants vont se substituer à certains atomes initiaux et ainsi introduire davantage d'électrons ou de trous. Les atomes dopants sont en phase diluée : leur concentration reste négligeable devant celle des atomes du matériau initial .Les dopants peuvent être introduits lors de composant. Parmi les méthodes de dopage alors utilisées on peut citer essentiellement le dopage par diffusion ou par implantation ionique.

Dans ce travail, nous allons étudier les paramètres électriques de la cellule solaire à substrat de type P et d'émetteur type N^+ réalisé par diffusion thermique et implantation ionique.

Et ce, afin d'essayer de faire une comparaison entre ces deux cellules à émetteurs différentes et étudier leurs effets sur les performances photovoltaïques.

Les résultats de l'étude sont générés par le logiciel de simulation PC1D (Personal computer one Dimension) en considérant le condition de l'éclairement AM1.5 . Pour se faire, nous présentons ce travail de la façon suivante :

- Dans le premier chapitre, nous décrivons les notions essentielles sur l'ensoleillement et les différents types de rayonnement solaire ainsi que déterminer la longueur d'onde de la lumière nécessaire pour générer de l'énergie électrique pour chaque matériau semi-conducteur.
- Ensuite au sein du deuxième chapitre, nous rappelons tout d'abord brièvement les notions fondamentales nécessaires des semi-conducteurs et la jonction P-N, partie centrale d'une cellule solaire élémentaire. Puis, nous présentons les différents types de recombinaisons dans la jonction P-N en surface et en volume. Nous abordons ensuite le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques principales et les technologies pour la réduction des pertes optiques.

- Dans le chapitre suivant, nous commencerons par rappeler les phénomènes et les mécanismes de dopage régissant les deux techniques de dopage, à savoir la diffusion thermique et l'implantation ionique.

- Enfin, dans le quatrième chapitre, nous exposons le logiciel de simulation PC1D, notamment sa partie concernant les cellules solaires. Nous utilisons la simulation numérique à une dimension pour mettre en évidence les paramètres prépondérants pour l'obtention des rendements appréciables pour les cellules solaires à émetteurs réalisés respectivement par diffusion thermique et par implantation ionique.

- On termine ce travail de cette étude comparative par une conclusion générale.

Chapitre 1

L'enseillement

1.1 Introduction

On rappelle dans ce chapitre la définition du soleil. On va voir Le type de rayonnement. Ensuite Le spectre du rayonnement solaire, et plus particulièrement le spectre solaire de référence AM1.5 G.

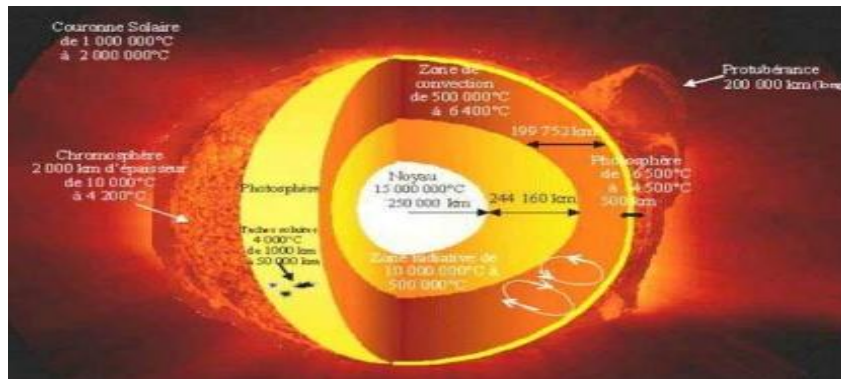
1.2 Le soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre. Sa lumière met environ 8 minutes à nous atteindre. Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques.

Caractéristiques principales du soleil :

Tableau 1 – Caractéristiques principales du soleil

Surface (km ²)	6,09.10 ¹²
Volume (km ³)	1,41x10 ¹⁸
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	2,5x10 ¹⁷



. Figure 1 – 1 : Structure du soleil.

1.3 La constante solaire C^*

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au Soleil. Sa valeur d'environ égale à 1367 W/m^2 (bien qu'elle varie dans l'année à cause des légères variations de la distance TerreSoleil.

La distance de la Terre au Soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'environ 300 000 km/s.

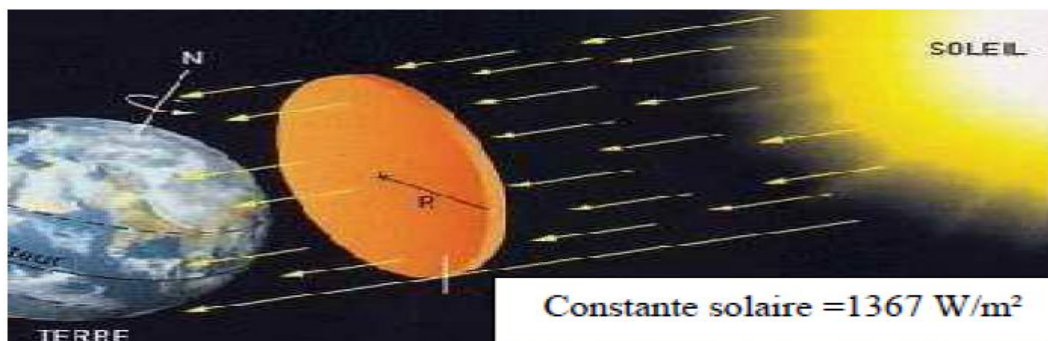


Figure 1-2 : la constante solaire.

1.4 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le soleil. En plus des rayons cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrêmement élevées, le soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible.

1.5 Le type de rayonnement

1.5.1 Le rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné en provenance d'un petit angle solide centré sur le disque solaire, il parvient en ligne droite et par temps clair. L'état du ciel est défini par deux coefficients, a et b qui symbolisent le trouble atmosphérique du lieu où se trouve le capteur solaire (tableau). La transmissivité totale de l'atmosphère pour le flux solaire incident direct est donnée par :

$$\tau_{dir} = a \cdot \exp \frac{-P \times b}{1000 \times \sin h} \quad (1-1)$$

Où:

a, b : Les coefficients traduisant les troubles atmosphériques.

h : Hauteur du soleil.

P : pression atmosphérique du lieu.

Tableau 2 – Quelques valeurs des coefficients du trouble atmosphérique

	Ciel pur	Conditions normales	Zones industrielles
a	0,87	0,88	0,91
b	0,17	0,26	0,43

Le tableau suivant donne la variation de la pression atmosphérique avec l'altitude :

Tableau 3 – Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude

Altitude (m)	0	500	1000	1500	2000	5000
P (mbar)	1000	950	900	850	800	500

Le rayonnement direct reçu sur un plan horizontal est donné par :

$$G_{dir}^h = C^* \times T_{dir} \quad (1-2)$$

G_{dir}^h : L'éclairement énergétique direct reçu sur un plan horizontal.

C^* : La constante solaire

L'éclairement énergétique G_{dir} reçu sur un plan incliné est donné par :

$$G_{dir} = G_{dir}^h \cos(\theta) \quad (1-3)$$

θ : angle d'incidence des rayons solaires.

1.5.2 Le rayonnement solaire diffus

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réflexion par le sol, il parvient de toute la voûte céleste. La relation entre le coefficient de transmission du flux direct et diffus est :

$$\tau_{dif} = 0,2710 - 0,2939 \cdot \tau_{dir} \quad (1-4)$$

$$G_{dir}^h = C^* \cdot \sin(h) \cdot \tau_{dif} \quad (1-5)$$

Le flux diffus reçu sur un plan incliné est défini par :

$$G_{dif} = G_{dif1} + G_{dif2} \quad (1-6)$$

$$G_{dif1} = G_{dif}^h \cdot \frac{1+\cos(i)}{2} \quad (1-7)$$

$$G_{dif2} = alb \frac{1+\cos(i)}{2} (G_{dif}^h \cdot \sin(h) + G_{dif}^h) \quad (1-8)$$

G_{dif1} , G_{dif2} : rayonnements diffusés par le ciel et par le sol respectivement.

alb : albédo du sol.

i: angle d'inclinaison du plan du capteur par rapport à l'horizontale.

1.5.3 Le rayonnement global

Le rayonnement global (G) est la somme des rayonnements diffus et direct

$$G = G_{\text{dir}} + G_{\text{dif}} \quad (1-9)$$

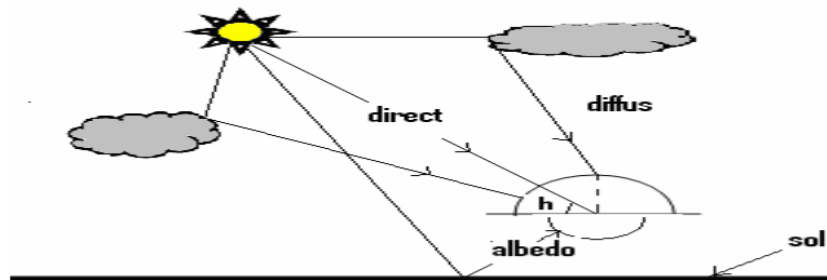


Figure 1 –3 : Différentes composantes du rayonnement solaire.

1.6 Le spectre du rayonnement solaire :

Le spectre solaire est la distribution spectrale du rayonnement solaire en fonction de la longueur d'onde, l'énergie de chaque photon est reliée à la longueur d'onde λ par la formule de Planck - Einstein suivante :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad (1-10)$$

Où

λ : est la longueur d'onde.

h : est la constante de Planck. ($h=6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s).

c : est la vitesse de la lumière. ($c = 3 \cdot 10^8$ m.s⁻¹).

Dans le cas de l'Arséniure de Gallium (GaAs), la longueur d'onde qui correspond à son gap d'énergie 1,42 eV est $\sim 0,873 \mu\text{m}$. La figure (1 – 4) aide à visualiser le concept de l'absorption lumineuse. Quand la lumière a une énergie supérieure à 1,1 eV (plus grand que le gap), la cellule solaire de silicium cristallin produit de l'électricité. La lumière d'énergie inférieure à

1,1 eV est inutilisée car le photon ne peut être absorbé et transmis à travers son épaisseur. De même, la lumière avec une valeur d'énergie supérieure à 1.43 eV excite les électrons de l'enveloppe extérieure de la cellule solaire de GaAs. Et finalement, la lumière avec une énergie supérieure à 1,7 eV est utile pour le matériel photovoltaïque aluminium d'arséniure de gallium (AlGaAs).

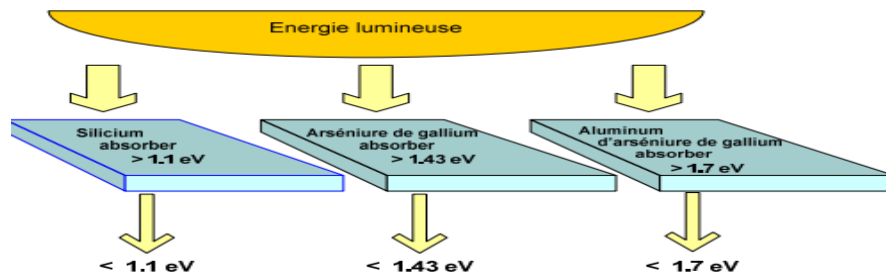


Figure 1 – 4 : Effet de l'énergie lumineuse sur les différentes bandes interdites.

Donc pour qu'il y ait création des paires électrons-trous, il faut que l'énergie transportée par les photons arrivant au dispositif soit supérieure ou égale à la bande interdite du matériau semi-conducteur utilisé ; c'est-à-dire $E \geq E_g$. La figure 4 représente la gamme du rayonnement électromagnétique entourant le spectre visible et les longueurs d'ondes correspondantes.

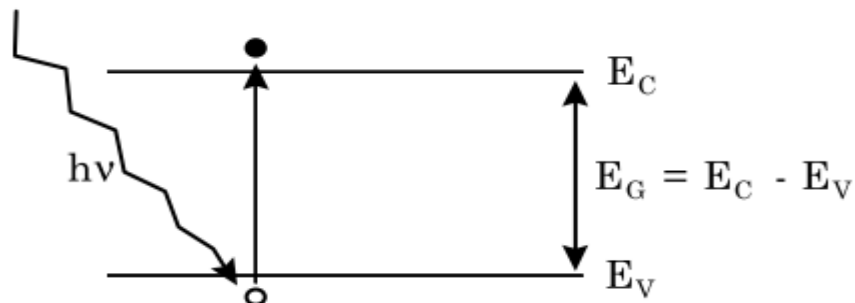


Figure1-5 : Création de paires électron-trou.

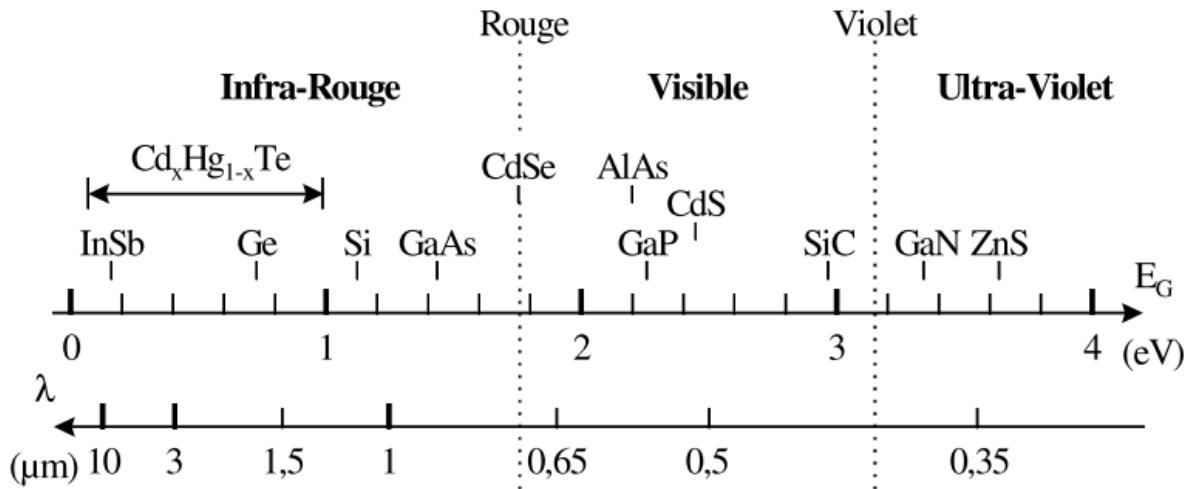


Figure 1 – 6 : Diagramme des longueurs d'onde absorbée par les semi-conducteurs.

1.7 La masse d'air :

Quand le soleil est directement vertical (position du zénith), la quantité d'énergie reçue à midi est max car l'épaisseur de l'atmosphère est minimum au niveau de la mer, c'est repéré comme : Air Mass 1 (AM1), masse d'air. L'énergie solaire atteignant la surface terrestre dans cette condition n'est plus que de 1000 Wm^2 . N'importe quel changement de l'angle du soleil (l'AM>1) l'énergie arrivant à la surface de la terre diminue.

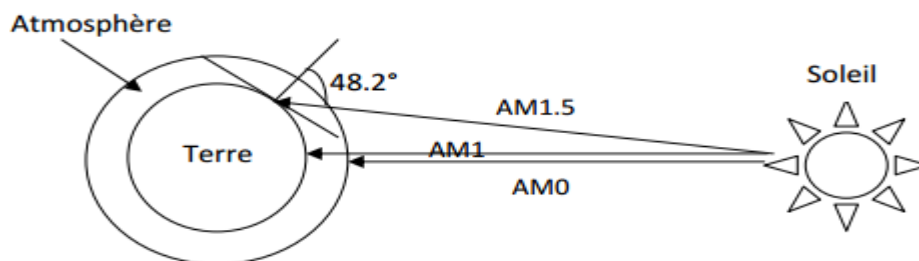


Figure 1 – 7 Définition de l'Air Masse

L'Air Masse définie par :

$$AM = 1 / \cos \theta \quad (1-11)$$

α : l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale.

- AM1 = correspond au soleil au zénith.
- AM1.5 = correspond ($\theta = 48,19^\circ$).
- AM0 utilisé pour préciser les conditions au dessus de l'atmosphère.

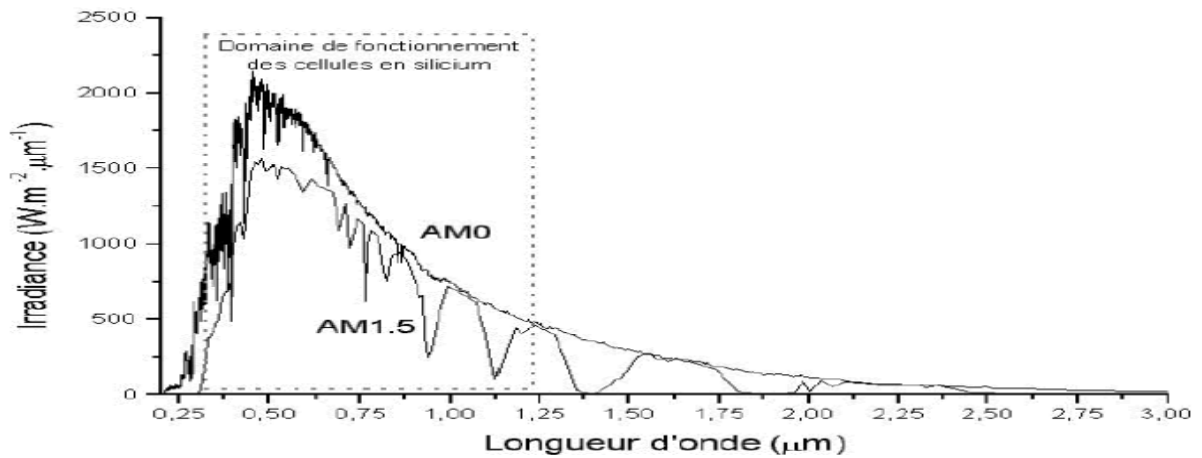


Figure 1-8 : Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5

Il apparaît que la partie la plus importante du spectre solaire à la surface de la terre concerne le domaine du visible et du proche infrarouge. Les irradiantes définies par le nombre AM ne tiennent toutefois pas compte de la variété des conditions climatiques, et de l'altitude du lieu.

Chapitre 2

Physique des cellules solaires

2.1 Introduction

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. On rappelle les principales notions des semi-conducteurs. Ensuite, On va entamer aussi l'étude d'une jonction PN et Nous aborderons le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, les quatre paramètres de la cellule et en fin Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque.

2.2 Le Semi-conducteur

Une manière commune de classer un matériau est de le faire par ses propriétés électriques. Selon le niveau de la résistivité d'un élément, il peut être classé par catégorie comme isolant, conducteur, ou semi-conducteur. La capacité de résister ou de conduire l'électricité d'un matériau dépend de beaucoup de facteurs : sa structure de réseau, ses électrons libres, l'énergie de sa bande interdite, et la température de fonctionnement. Quelques matériaux ont des propriétés électriques très discrètes qui les définissent en tant qu'isolant ou conducteur. Cependant, d'autres matériaux tels que le silicium (Si) et l'arséniure de gallium (GaAs) peuvent agir en tant qu'isolant ou conducteur et sont donc considérés comme des semi-conducteurs.

La figure 2-1 montre la gamme typique des conductivités pour les isolants, les conducteurs, et les semi-conducteurs. Des semi-conducteurs peuvent être trouvés sous la forme élémentaire ou composée. Le silicium et le germanium sont des exemples des semi-conducteurs élémentaires, qui appartiennent au groupe IV du tableau chimique périodique de Mendeleïev. La figure 2-2 montre une partie de ce tableau. En plus des semi-conducteurs du groupe IV, des composés peuvent être obtenus avec des éléments à partir des groupes III et V. Les

exemples des semi-conducteurs III-V incluent le phosphure d'aluminium (AlP), le nitrure de gallium (GaN), le phosphure d'indium (InP), l'arséniure de gallium (GaAs). Notamment, Il est possible de faire des composés de semi-conducteurs à partir des groupes II-VI, tel que l'oxyde de zinc (ZnO), le tellurure de cadmium (CdTe), le sulfure de mercure (HgS).

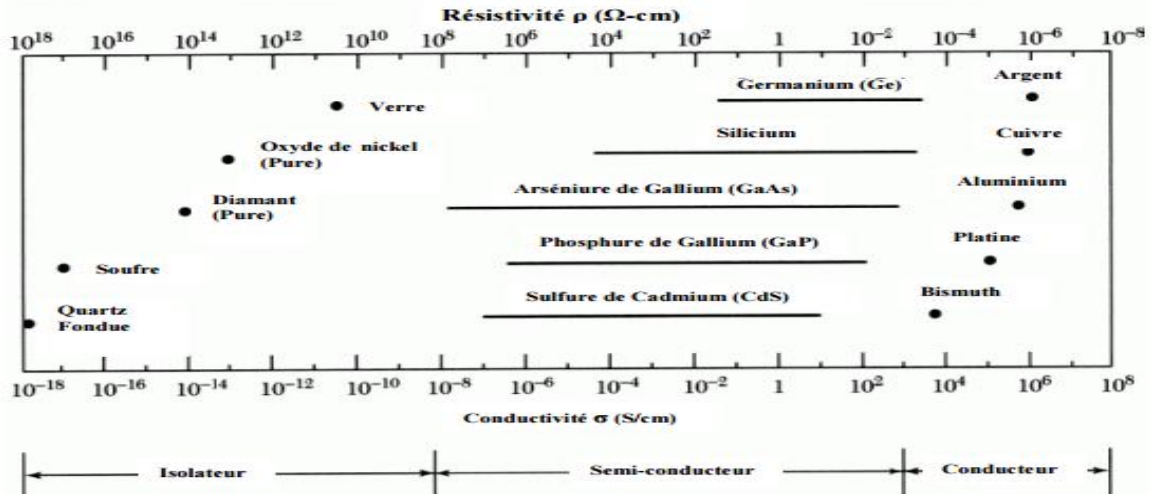


Figure 2 –1 : Résistivité pour différents types de matériaux.

								VIIIA
								² He 4.003
		IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA		
		5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne 20.183	
		13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.064	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948	
IB	IIB							
29 Cu 63.54	30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.922	34 Se 78.96	35 Br 79.909	36 Kr 83.80	
47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30	
79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.980	84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)	

Figure 2 – 2 : Tableau périodique partiel.

2.3 Bandes d'énergie

Les électrons d'un atome isolé prennent des niveaux discrets d'énergie, qui sont en fait constitués de sous-niveaux (ou sous-couches), mais lorsqu'on rapproche deux atomes ces

niveaux (ou sous-niveaux) vont se dédoubler. En étendant ce raisonnement à N atomes, cette «dégénérescence» fait apparaître des bandes d'énergie permises, qui peuvent «s'interpénétrer» et se séparer à nouveau lorsque la distance inter-atomique diminue, donnant des bandes interdites, de largeur E_G «gap» et des bandes permises ([Chovet. A. & Masson](#)).

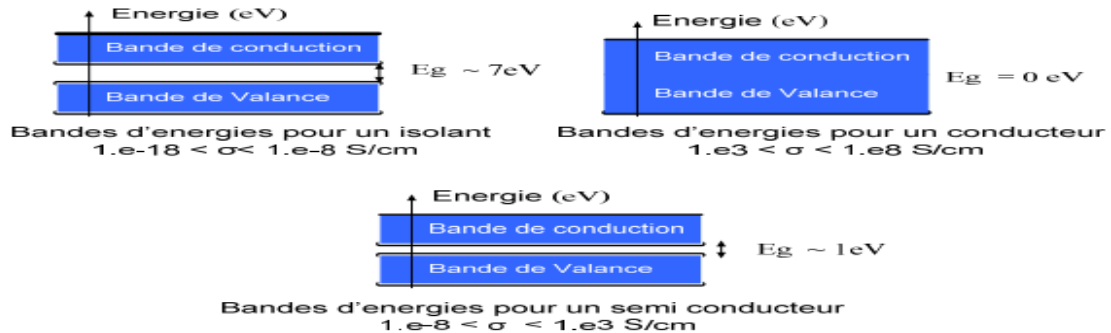


Figure 2 – 3 : Diagrammes des bandes d'énergie dans différents types de matériaux.

- Dans les isolants, la bande de conduction est habituellement vide.
- Dans les conducteurs, la conductivité diminue avec la température puisque l'agitation thermique pénalise le mouvement organisé des porteurs libres.
- Dans les semi-conducteurs, le gap assez faible permet à des porteurs de passer dans la bande de conduction (BC) simplement grâce à leur énergie d'agitation thermique

Tableau 4 - La valeur du gap de quelques semi-conducteurs ([Modèle PC1D](#))

Semi-conducteur	E_g (eV) à 300 °K
GaAs	1,5
Si	1,16
Ge	0,74

La figure (2 –4) montre l'évolution des énergies du gap du Si, Ge et GaAs en fonction de la température.

Le modèle représenté sur cette figure suit le modèle utilisé dans PC1D et dans l'expression ci-dessous :

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{\beta + T} \quad (2-1)$$

α et β sont donnés dans le tableau suivant pour les matériaux semi-conducteurs.

Tableau 5 – Coefficients de l'énergie du gap .

	Ge	Si	GaAs
α [eV/°K]	$4,77 \cdot 10^{-4}$	$4,73 \cdot 10^{-4}$	$5,41 \cdot 10^{-4}$
β [°K]	235	636	204

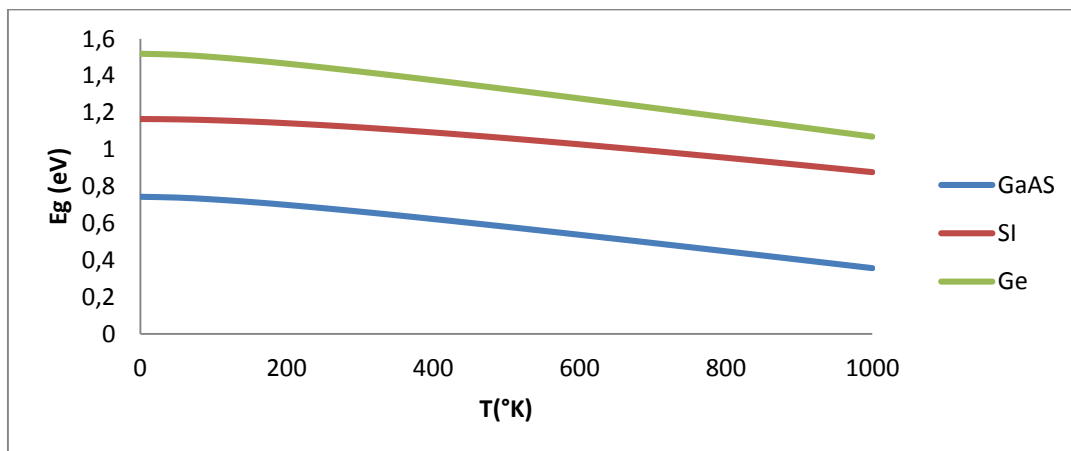


Figure 2 –4 : Evolution d'énergie de gap pour le Si, le Ge et le GaAs en fonction de la Température.

2.4 Semi-conducteur intrinsèque

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

2.4.1 Cristal du silicium

La structure du silicium cristallin qui est généralement obtenue en structure tétraédrique de diamant. Le réseau se compose d'une structure de deux cubiques à face centrée supplantées diagonalement de l'un à l'autre par la distance égale à un quart de la longueur de la diagonale de la cellule périodiquement répétée. Sa cellule d'unité se compose de huit atomes et tous les atomes de silicium sont en covalence liés aux 4 atomes voisins les plus proches. Les longueurs des liaisons sont égales à 2,37 Å, et l'angle entre les liaisons égale à 109°. Le paramètre de maille du cristal du silicium $a=5,43$ Å.

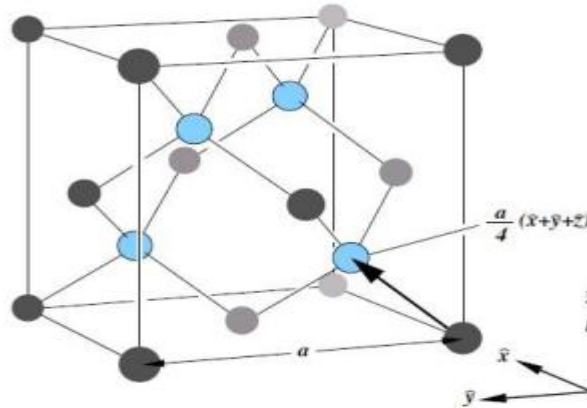


Figure 2 -5 Structure cristalline du Si

2.4.2 Concentration intrinsèque

A l'équilibre thermique, les densités totales d'électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} n = \frac{2}{h^3} (2\pi m_e K_B T)^{\frac{3}{2}} \exp\left[\frac{E_F - E_C}{K_B T}\right] = N_C \exp\left[\frac{E_F - E_C}{K_B T}\right] \\ p = \frac{2}{h^3} (2\pi m_h K_B T)^{\frac{3}{2}} \exp\left[\frac{E_V - E_F}{K_B T}\right] = N_V \exp\left[\frac{E_V - E_F}{K_B T}\right] \end{cases} \quad (2-2)$$

Où :

E_C : Le niveau énergétique du bas de la bande de conduction du semi-conducteur.

E_V : Le niveau énergétique du haut de la bande de valence du semi-conducteur.

E_F : Le niveau de Fermi.

E_g : L'énergie du gap.

K_B : La constante de Boltzmann.

h : La constante de Planck.

T : La température absolue de matériau (en °K).

N_c et N_v sont respectivement la densité effective d'états des électrons dans la bande de conduction et la densité effective d'états des trous dans la bande de valence.

Avec

$$\begin{cases} N_C = 2,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{m_e}{m_0}\right)^{3/2} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} \text{ cm}^{-3} \\ N_V = 2,5 \cdot 10^{19} \left(\frac{m_h}{m_0}\right)^{3/2} \left(\frac{T}{300}\right)^{3/2} \text{ cm}^{-3} \end{cases} \quad (2-3)$$

m_e, m_h : sont respectivement les masses effectives des électrons et des trous

m_0 : La masse de l'électron au repos, soit $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$

Tableau 6 - La densité effective d'états des électrons et la densité effective d'états des trous de quelques semi-conducteurs à 300 K

	m_e/m_0	m_h/m_0	$N_c(10^{19} \text{ cm}^{-3})$	$N_v(10^{19} \text{ cm}^{-3})$
Si	1,06	0,59	2,7	1,1
Ge	0,55	0,36	1,01	0,54
GaAs	0,066	0,64	0,04	1,28

La figure (2 –6) montre que l'évolution les densités d'états dans la bande de conduction et dans la bande de valence pour les semi-conducteurs.(Si, Ge et GaAs) en fonction de la température.

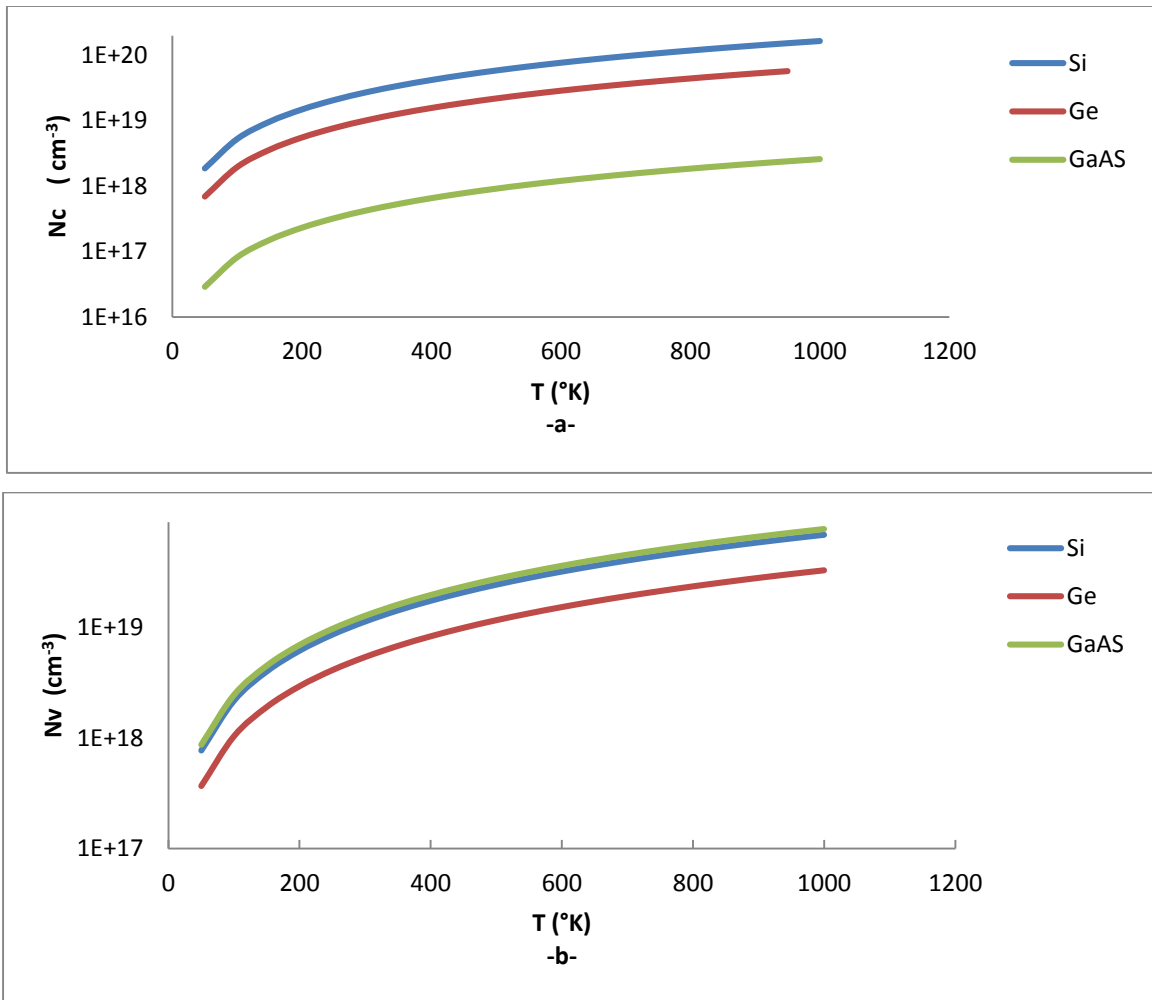


Figure 2 –6 : L'évolution des densités d'états dans la bande de conduction et dans la bande de valence pour les semi-conducteurs.

Un semi-conducteur intrinsèque est un matériau dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité des porteurs. Les électrons de la bande de conduction ne pouvant résulter que de l'excitation thermique des électrons de la bande de valence, les trous et les électrons existent nécessairement par paires ($p=n=n_i$), donc on obtient les expressions suivantes, pour la concentration intrinsèque des porteurs et le niveau de Fermi intrinsèque :

$$n_i = (N_C N_V)^{\frac{1}{2}} \exp\left[-\frac{E_g}{2K_B T}\right] \quad (2-4)$$

La figure (a et b) montre que $\ln(n_i)$ en fonction de $1/T$ est une droite de pente $-E_g/2K_B$ ce qui donne la possibilité de déduire E_g .

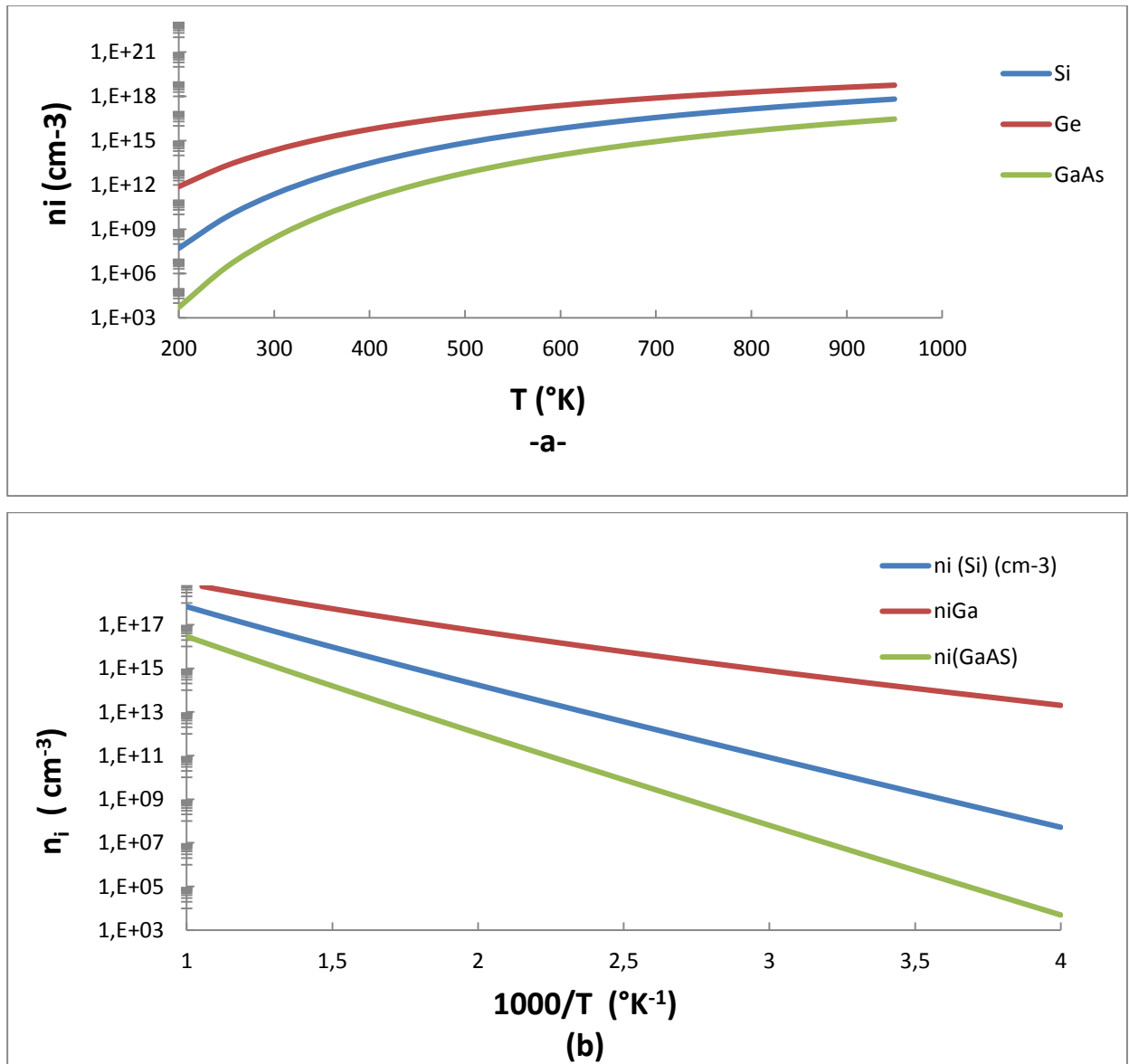


Figure 2 –7 : Evolution de la concentration intrinsèque pour le Si, le Ge et le GaAs.

a. En fonction de la Température. **b.** En fonction de l'inverse de la température.

La densité intrinsèque des porteurs est une fonction exponentielle du gap du matériau et de la température. Le tableau suivant donne les valeurs des densités de porteurs de quelques semi-conducteurs à la température ambiante.

Tableau7-La densité des porteurs intrinsèques de quelques semi-conducteurs à 300 K.

	Si	Ge	GaAs
n_i (cm ⁻³)	6,94.10 ⁹	2,01.10 ¹³	2,69.10 ⁶

Pour obtenir l'expression de E_F , on impose l'égalité $n=p$ donnés par les équations (2-6) :

$$N_c e^{E_{Fi}-E_v/K_B T} = N_v e^{E_v-E_{Fi}/K_B T} \quad (2-5)$$

$$E_{Fi} = \frac{1}{2} [E_V + E_C] + \frac{3}{4} K_B T \ln \frac{m_h}{m_e} \quad (2-6)$$

Le niveau de Fermi d'un semi-conducteur intrinsèque est très voisin du milieu du gap à la température ambiante. Soit :

$$E_F = \frac{1}{2} [E_V + E_C] \quad (2-7)$$

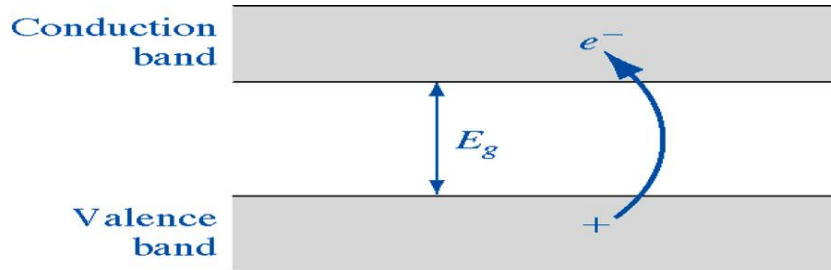


Figure 2 – 8: Niveau de Fermi dans un semi-conducteur intrinsèque.

2.5 Semi-conducteur extrinsèque

C'est un semi-conducteur extrinsèque dopé par des impuretés caractéristiques.

Le dopage va permettre de changer et surtout de contrôler les propriétés électriques du SC (La conductivité).

Il existe deux types de semi conducteurs extrinsèques:

2.5.1 Semi-conducteur dopé N:

Matériau dopé n est un semi-conducteur dont la concentration en électrons est largement supérieure à la concentration en trous. On y a introduit généralement du phosphore, de l'arsenic ou encore de l'antimoine. Prenons par exemple le cas du silicium dans lequel on introduit de l'arsenic (possède 5 électrons sur la couche extérieure). On associe à l'arsenic un niveau donneur E_d dans la bande interdite très proche de la bande de conduction. L'intérêt est que pour les températures supérieures à 0°K , les atomes d'arsenic sont ionisés ce qui revient à faire passer l'électron du niveau donneur à la bande de conduction. La concentration.

de donneurs sera donc supérieure à la concentration d'accepteurs ($N_d - N_a > 0$) ce qui correspond à la définition d'un semi-conducteur dopé n.

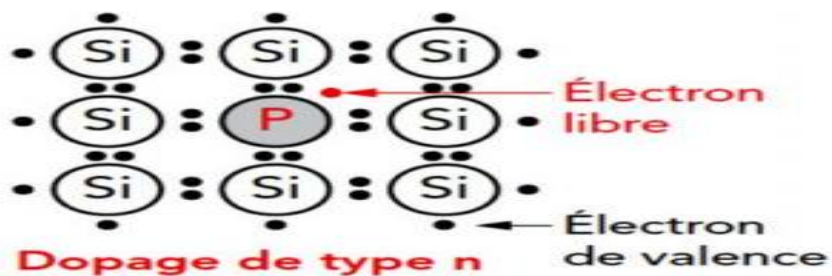


Figure 2 – 9 : Dopage du semi-conducteur (Type N)

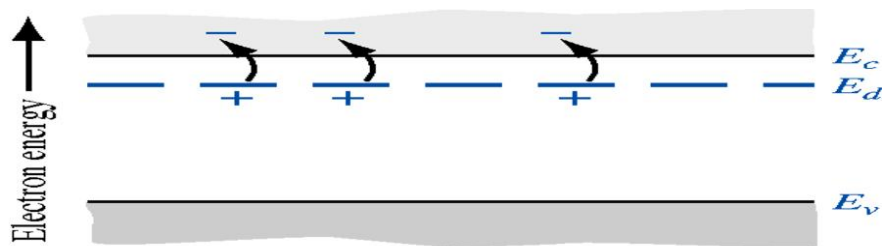


Figure 2 – 10: Niveau «donneur» dans la Bande Interdite.

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

$$n = n_0 + N_d \quad (2-8)$$

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

2.5.2 Semi-conducteur dopé P

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

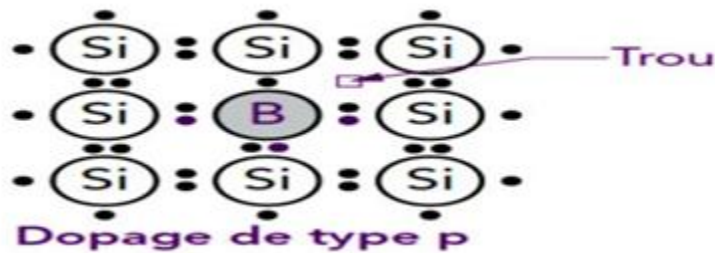


Figure 2 – 11 : Dopage du semi-conducteur (Type P)

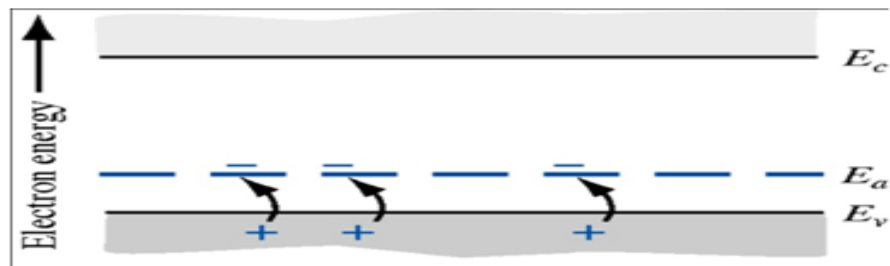


Figure 2 – 12 : Niveau «accepteur » dans la Bande Interdite.

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

$$p = p_0 + N_a \quad (2-9)$$

2.6 Densité de charges dans un semi-conducteur

Si l'on considère un Semi-conducteur possédant une densité N_d d'atomes donneurs et une densité N_a d'atomes accepteurs on peut estimer qu'à la température ordinaire toutes les impuretés sont ionisées.

Il en résulte le bilan des charges suivant:

$$n + N_a = p + N_d \quad (2-10)$$

$N_a = 0$ et $N_d \gg p \Rightarrow n \approx N_d$: Les électrons sont les porteurs majoritaires.

La densité des donneurs ionisés N_d^+ s'écrit

$$N_d^+ = \frac{N_d}{1 + 2 \exp\left(\frac{E_F - E_d}{k_B T}\right)} \quad (2-11)$$

E_d : étant le niveau d'énergie donneur

Semi-conducteur dopé P:

$N_d = 0$ et $N_a \gg n \Rightarrow p \approx N_a$: Les trous sont les porteurs majoritaires.

La densité des accepteurs ionisés N_a^- s'écrit :

$$N_a^- = \frac{N_a}{1 + \frac{1}{4} \exp\left(\frac{E_a - E_F}{k_B T}\right)} \quad (2-12)$$

E_a : étant le niveau d'énergie accepteur.

Le matériau semi-conducteur étant globalement neutre, l'équation de la neutralité électrique s'écrit :

$$n + N_a^- = p + N_d^+ \quad (2-13)$$

2.7 Courant dans les semi-conducteurs

Les courants dans le semi-conducteur résultent du déplacement des porteurs de charge électrons et trous, sous l'action de différentes forces, l'origine de ces forces étant un champ électrique (courant de conduction) ou un gradient de concentration (courant de diffusion).

2.7.1 Courant de conduction

L'application d'un champ électrique E au semi-conducteur induit la conduction des deux types de porteurs, simultanément. Les électrons se déplacent au niveau de la bande de conduction, les trous (et donc les électrons liés) au niveau de la bande de valence la densité de courant totale est donc la somme des deux densités de courant.

$$\begin{cases} \vec{J}_n = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot \vec{E} \\ \vec{J}_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot \vec{E} \end{cases} \quad (2-14)$$

Ces relations sont valables pour des champs électriques suffisamment faibles pour que la vitesse des porteurs reste proportionnelle au champ. La densité du courant dans le semi-conducteur dans lequel on a créé un champ électrique est donc donné par la contribution des électrons et des trous :

$$\vec{J}_C = \vec{J}_n + \vec{J}_p = q (\mu_n n + \mu_p p) \vec{E} = \sigma \vec{E} \quad (2-15)$$

E : Le champ électrique

μ_n, μ_p : sont respectivement la mobilité des électrons et des trous

$\sigma_{n,p}$: La conductivité du matériau pour les électrons et les trous

Le tableau 8- donne des valeurs de mobilités des électrons et des trous pour plusieurs semi-conducteurs

Tableau 8 - Mobilités des électrons et des trous pour quelques semi-conducteurs

	Si	Ge	GaP	GaAs	GaSb	InP	InAs	InSb
$\mu_n (cm^2/V.s)$	1350	3600	300	8000	5000	4500	30000	80000
$\mu_p (cm^2/V.s)$	480	1800	150	300	1000	100	450	450

2.7.2 Courant de diffusion

Lorsque les porteurs libres ne sont pas distribués uniformément dans le semi-conducteur ils sont soumis sous un processus général de diffusion. Leur mouvement s'effectue dans un sens qui tend à uniformiser leur distribution spatiale. Considérons un semi-conducteur dopé dont la concentration en trous varie suivant un axe x. La densité de courant de diffusion en un point d'abscisse x est :

$$J_{dp} = -qD_p \frac{dp}{dx} \quad (2-16)$$

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

$$J_{dn} = -qD_n \frac{dn}{dx} \quad (2-17)$$

Avec D_n et D_p les coefficients de diffusion (toujours positifs) pour les électrons et les trous exprimés en cm^2/s . Dans le cas d'un semi-conducteur non dégénéré, on peut exprimer ces coefficients en fonction de la mobilité des porteurs. Ces relations sont connues sous le nom de relations d'Einstein :

$$D_{n,p} = \mu_{n,p} \frac{k_B T}{q} \quad (2-18)$$

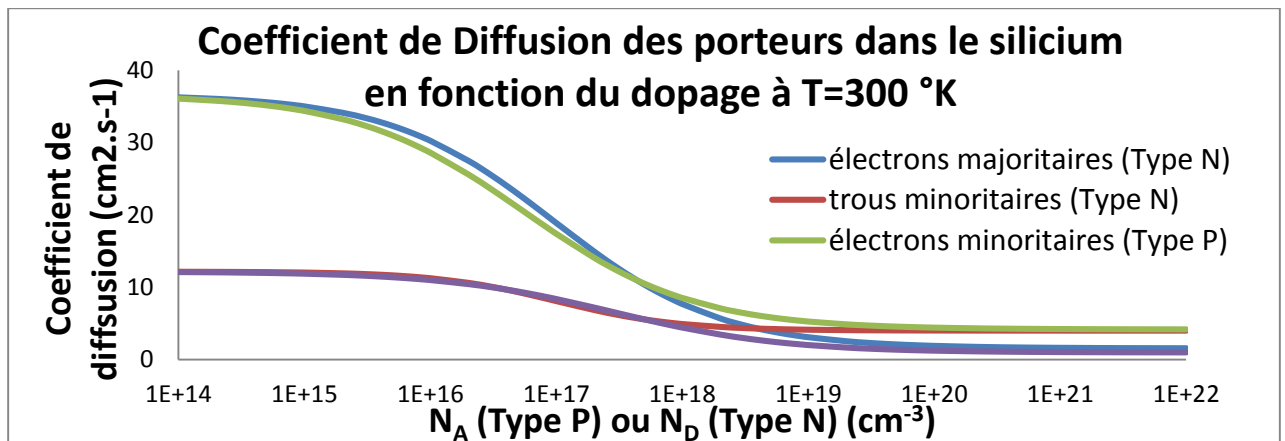


Figure 2 – 13 : Variation de coefficient de diffusion en fonction du dopage.

Le courant de diffusion total s'écrit comme la somme de ces deux composantes

$$J_d = J_{dn} + J_{dp} = qD_n \frac{dn}{dx} - qD_p \frac{dp}{dx} \quad (2-19)$$

La densité totale de courant pour les électrons et les trous est donnée par :

$$\begin{cases} J_n = q \cdot \mu_n \cdot n \cdot E + q D_n \frac{dn}{dx} \\ J_p = q \cdot \mu_p \cdot p \cdot E + q D_p \frac{dp}{dx} \end{cases} \quad (2-20)$$

2.8 La génération et la recombinaison des paires électrons–trous

2.8.1 La génération

Les électrons et les trous sont produits par des procédés qui peuvent fournir au moins l'énergie minimum de génération E_g d'une paire électron-trou. Cela comprend l'ionisation par impact, dans lequel un électron (ou un trou) avec une énergie cinétique suffisante frappe un électron lié (dans la bande de valence) hors de son état lié et le favorise à un état dans la bande de conduction, en créant ainsi un électron et un trou. Le même processus pour exciter un électron de la bande de valence à la bande de conduction peut se faire avec une vibration du réseau géant fournissant l'énergie, ou par l'absorption d'un photon. En présence d'impuretés fournissant des états d'énergies dans le gap d'énergie, l'excitation peut se dérouler en plusieurs étapes et l'énergie générée E_g peut être fournie en portions plus petites par des phonons ou même des photons.

Soit $\phi_i(\lambda)$, la densité du flux de photons incidents (photons/unité de temps) pour chaque longueur d'onde λ , arrivant sur le semi-conducteur à sa surface en $x=0$.

$$\phi(\lambda)_{(x=0)} = \phi_i(\lambda) = \frac{P_i(\lambda)}{h\nu} = \frac{P_i(\lambda)}{h\frac{c}{\lambda}} \quad (2-21)$$

Où $p_i(\lambda)$ est la puissance incidente du rayonnement à la longueur d'onde correspondante.

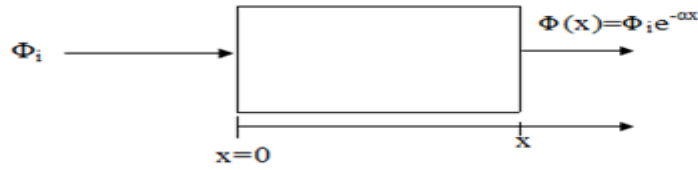


Figure 2 – 14 : La loi de Beer-Lambert.

Selon la loi de Beer-lambert, le flux de photons à la position X est exprimé par :

$$\phi(x) = \phi_i(\lambda)e^{(-\alpha x)} \quad (2-22)$$

Avec α le coefficient d'absorption (en cm^{-1}) dépend de la longueur d'onde des photons incidents, ainsi que du coefficient d'extinction k , selon la relation :

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2-23)$$

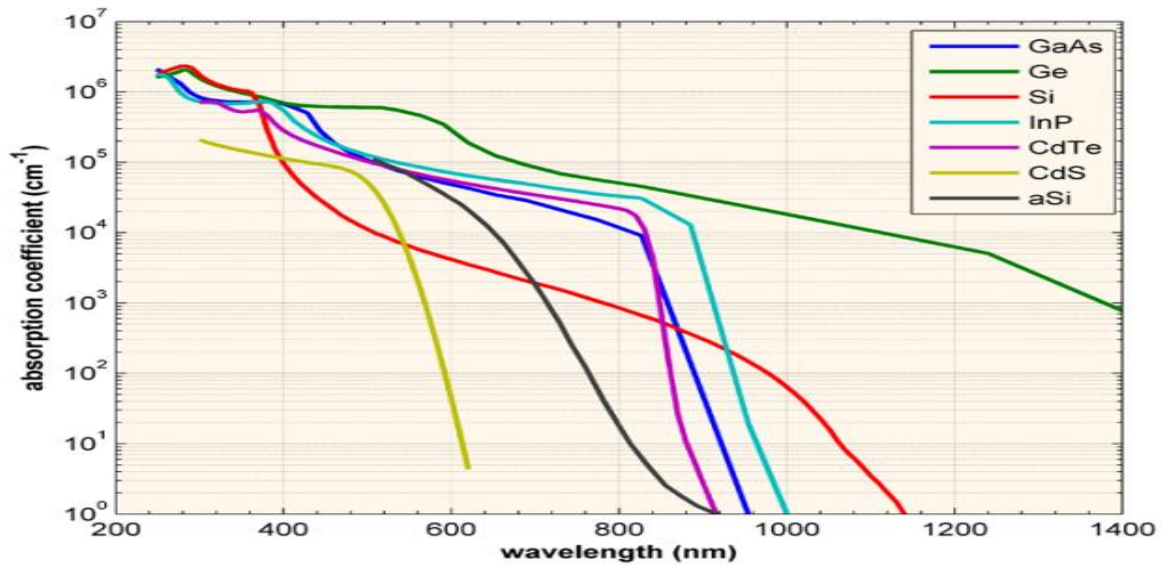


Figure 2 – 15 : Coefficient d'absorption des différents semi-conducteurs à 300 °K en fonction longueur d'onde

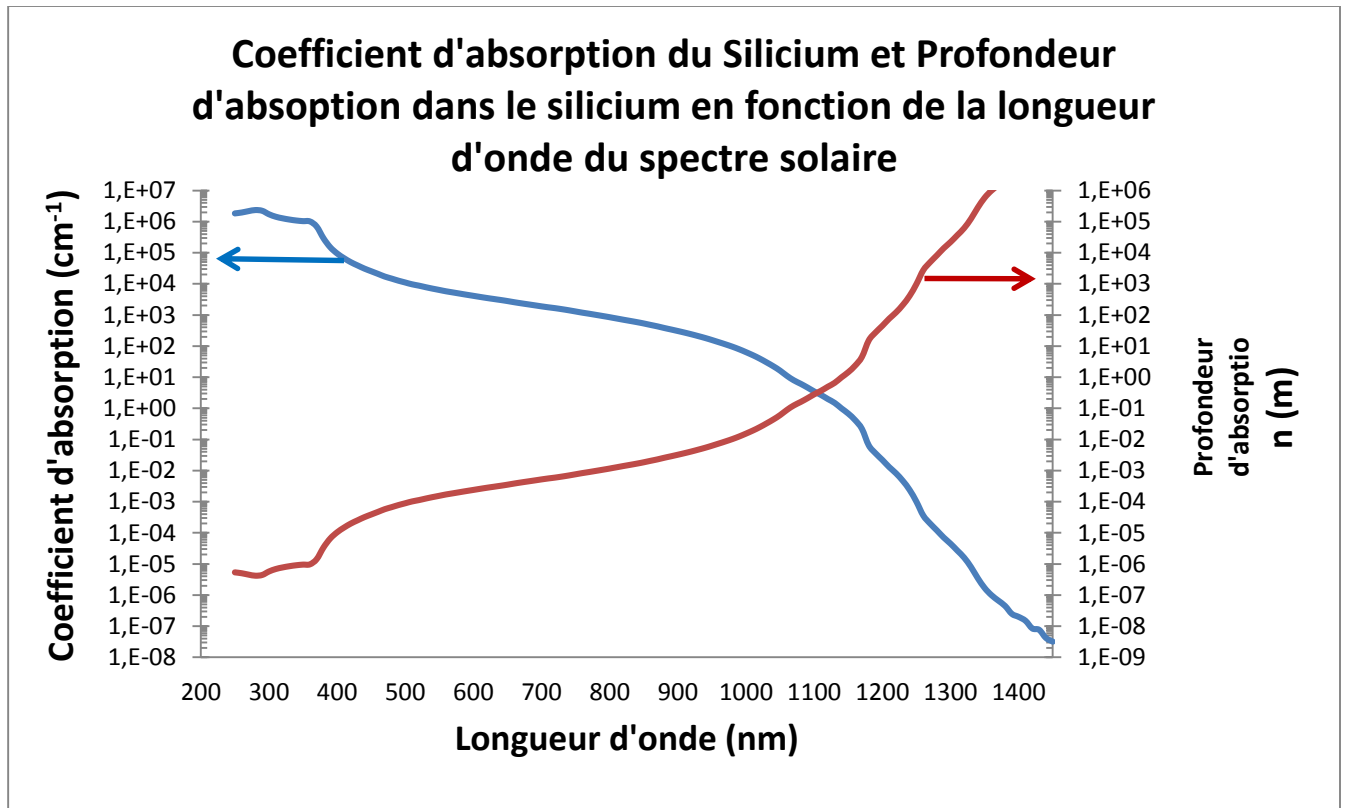


Figure 2 – 16 : Variation de coefficient d'absorption et profondeur d'absorption en fonction de la longueur d'onde .

2.8.2 Recombinaison des paires électrons–trous

La recombinaison est définie comme le mécanisme inverse de la génération. Elle engage une perte d'énergie; les porteurs en excès disparaissent en rétablissant leur équilibre thermodynamique. Un semi-conducteur ayant subi une perturbation reconstitue son équilibre thermodynamique à travers plusieurs mécanismes possibles :

- Recombinaison directe (bande à bande),
- Recombinaison indirecte (de bande aux impuretés, avec l'aide de pièges) (SHR),
- Recombinaison Auger,
- Recombinaison de surface.

A chaque mécanisme de recombinaison des porteurs, un taux R est associée à une durée de vie τ par la relation (2-24).

$$R = \frac{\Delta n}{\tau} \quad (2-24)$$

Avec Δn : concentration de porteurs en excès. La neutralité électrique du matériau étant conservée, on a : $\Delta n = \Delta p$

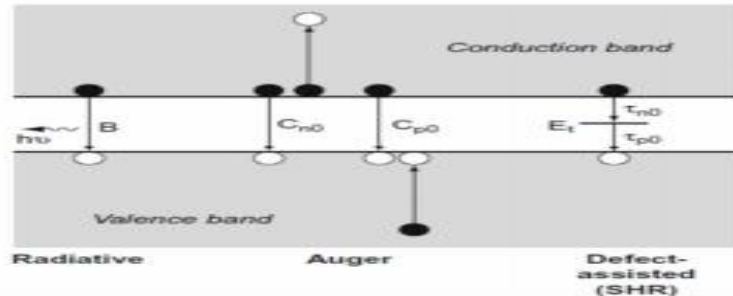


Figure 2 –17: Schéma des principaux processus de recombinaison dans un semi-conducteur.

2.8.2.1 La recombinaison radiative (ou bande à bande)

Ce mécanisme est dominant dans les semi-conducteurs purs, dotés d'une structure à gap direct tel que le *GaAs*. La recombinaison radiative est décrite comme le mécanisme inverse de l'absorption optique, un électron dans la bande de conduction se combine avec un trou dans la bande de valence. L'énergie du photon émis correspondra à l'énergie du gap de la bande interdite du matériau, ce phénomène se caractérise par la courte durée de vie des porteurs minoritaires. Le taux de recombinaison total est proportionnel à la concentration dans matériau. En absence de phénomène de génération. Le taux de recombinaison total est calculé par formule suivante :

À l'équilibre thermodynamique : $p=p_0$ $n=n_0$ $R=0$

$$R_{rad} = B(np - n_i^2) \quad (2-25)$$

Où :

B : constante qui dépend du semi conducteur utilisé.

n_i : La concentration intrinsèque.

n et p les concentrations des électrons et des trous à l'équilibre.

On régime hors équilibre :

$$\begin{cases} n = n_0 + \Delta n \\ p = p_0 + \Delta p \end{cases} \quad (2-26)$$

Condition de neutralité : $\Delta n = \Delta p$

L'expression précédente devient :

$$r = \frac{\Delta n}{\tau(\Delta n)} = \frac{\Delta p}{\tau(\Delta p)} \quad (2-27)$$

La durée de vie associée à ce phénomène est décrite par la Relation (2-28):

$$\tau(\Delta n) = \frac{1}{B(p_0 + n_0 + \Delta n)} \quad (2-28)$$

On s'intéresse au régime de faible injection

➤ Dans le cas d'un SC type P en régime de faible injection :

$$p_0 \gg n_0 \quad \Delta n = \Delta p \ll p_0$$

$$\tau_p = \frac{1}{B p_0} \quad (2-29)$$

➤ Dans le cas d'un SC type N en régime de faible injection :

$$n_0 \gg p_0 \quad \Delta n = \Delta p \ll n_0$$

$$\tau_n = \frac{1}{B n_0} \quad (2-30)$$

Alors qu'en forte injection, la durée de vie radiative est dépende du niveau d'injection :

$$\tau_R = \frac{1}{B \Delta n} \quad (2-31)$$

ζ_n et ζ_p : La durée de vie des porteurs minoritaires dans un SC.

Le tableau 9- donne les valeurs de ces coefficients de la recombinaison pour Si, GaAs et InP.

Tableau 9 – Le coefficient de la recombinaison radiative B

Matériau	B (cm ³ .s ⁻¹)
Si	1,8.10 ⁻¹⁵
GaAs	7,2.10 ⁻¹⁰
Inp	6,25.10 ⁻¹⁰

2.8.2.2 La recombinaison SHR(Shockley- Hall -Read)

A l'inverse du premier mécanisme, la recombinaison assistée se produit dans les semi-conducteurs à gap indirect comme le Si. Ce mécanisme appelé aussi « Shockley- Hall Read- », Introduit une étape dans transition entre les bandes de conduction et de valence (la zone de déplétion) sous forme d'un piège situé à un niveau dans la bande interdite. Le défaut provient des impuretés ou de la structure du réseau.

Le taux recombinaison indirect pour une concentration de défaut N_t située dans un niveau d'énergie E_t dans la bande interdite est représenté par la formule de Shockley- Hall -Read :

$$R_{SHR} = \frac{(np - n_i^2)}{\tau_{p0}(n + n_1) + \tau_{n0}(p + p_1)} \quad (2-32)$$

$$\tau_{p0} = \frac{1}{\sigma_p v_{th} N_t} \quad \text{et} \quad \tau_{n0} = \frac{1}{\sigma_n v_{th} N_t}$$

$$\text{Où : } n_1 = n_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right) \quad \text{et} \quad p_1 = p_i \exp\left(\frac{E_t - E_i}{kT}\right)$$

N_t : Concentration des défauts

τ_{p0} et τ_{n0} sont les durées de vie fondamentales des trous et des électron

σ_n et σ_p : Sections efficaces de la capture par le trou et l'électron

v_{th} : La vitesse thermique.

E_i : Le niveau de Fermi intrinsèque.

R_{SHR} : est donné en : porteurs libres cm⁻³.s⁻¹.

La durée de vie SHR peut donc s'écrire sur la forme suivante :

$$\tau_{SHR} = \frac{\Delta n}{R_{SHR}} = \frac{\tau_{n0}(p_0+p_1+\Delta n)+\tau_{p0}(n_0+n_1+\Delta n)}{n_0+p_0+\Delta n} \quad (2-33)$$

Notons qu'on a implicitement supposé un défaut introduisant un seul niveau discret dans la bande interdite, et que les défauts proches du centre du gap sont les plus actifs en recombinaisons. Cela nous permet de simplifier la durée de vie SHR :

➤ Pour un semi-conducteur de type P

Pour faible injection : $\tau_{SHR} = \tau_{p0}$ (2-34)

en forte injection: $\tau_{SHR} = \tau_{n0} + \tau_{p0}$ (2-35)

• Pour un semi-conducteur de type N :

Pour faible injection : $\tau_{SHR} = \tau_{n0}$ (2-36)

et en forte injection $\tau_{SHR} = \tau_{n0} + \tau_{p0}$ (2-37)

2.8.2.3 La recombinaison Auger

C'est le mécanisme qui intervient lors d'une forte concentration de porteurs libres, comme dans les semi-conducteurs à gap indirect, l'énergie libérée par la recombinaison transfère un électron à un niveau supérieur de la bande de conduction, ou un trou, à niveau plus profond de la bande de valence. Le taux de la recombinaison est calculé par la formule

$$R_{Auger} = (C_p p + C_n n)(np - n_i^2) \quad (2-38)$$

Où :

C_p et C_n sont les coefficients de capture d'Auger du trou et de l'électron.

Dans le silicium $C_n=2,8.10^{-31}cm^6s^{-1}$ et $C_p=0,99.10^{-31} cm^6s^{-1}$, ils dépendent de la température.

En régime de faible injection, la durée de vie associée aux recombinaisons Auger ζ_{Auger} est indépendante du niveau d'injection, elle est inversement proportionnelle au carré du dopage par exemple pour un semi conducteur de type P :

$$\tau_{Auger} = \frac{1}{C_p N_A^2} \quad (2-39)$$

Alors qu'en forte injection, la durée de vie Auger dépend du niveau d'injection :

$$\tau_{Auger} = \frac{1}{(C_n + C_p)\Delta n^2} \quad (2-40)$$

2.8.2.4 La recombinaison en surface (superficielle)

La surface d'un semi-conducteur présente de nombreux défauts, suite aux traitements qu'elle subit lors du polissage et de l'attaque chimique. L'oxyde natif qui, dans un milieu ambiant, croît en quelques minutes sur plusieurs dizaines d'angströms (Å) profondément la structure

Cristalline au voisinage de la surface. Quand on éclaire uniformément le matériau, la recombinaison superficielle provoque une concentration en porteurs excédentaires moins importante en surface que dans le volume. Afin de pallier ce déséquilibre, les porteurs générés diffusent vers la surface, donnant naissance à un courant de diffusion

$$\begin{cases} J_{surface} = qS_p(p_n - p_{n0}) \text{ pour le matériau de type N} \\ J_{surface} = qS_p(p_n - p_{n0}) \text{ pour le matériau de type P} \end{cases} \quad (2-41)$$

Où

S : est la vitesse de recombinaison en surface (cm.s^{-1}).

On peut parler d'une durée de vie des minoritaires à la surface τ_s d'une wafer d'épaisseur w , qui exprime les recombinaisons aux deux surfaces de ce wafer :

- Pour une même vitesse de recombinaison sur les deux surfaces, $S_f = S_r = S$:

$$\tau_s = \frac{w}{2S} + \frac{1}{D} \left(\frac{w}{\pi}\right)^2 \quad (2-42)$$

S_f, S_r représentent respectivement, les vitesses de recombinaison des porteur minoritaires sur la surface et la surface arrière d'un échantillon d'épaisseur w .

- Si les deux surfaces sont parfaitement passivées, $S_f = S_r = 0$:

$$\tau_s = \infty \quad (2-43)$$

- Si une de deux surfaces est parfaitement passivée, $S_r = 0$

$$\tau_s = \frac{w}{S_f} + \frac{4}{D} \left(\frac{w}{\pi}\right)^2 \quad (2-44)$$

- Pour des recombinaisons très élevées aux deux surfaces, $S_f = S_r = \infty$:

$$\tau_s = \frac{1}{D} \left(\frac{w}{\pi} \right)^2 \quad (2-45)$$

2.9 La jonction PN

Une jonction PN est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte (figure 2-18), c'est-à-dire que la transition de la zone P à la zone N se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse.

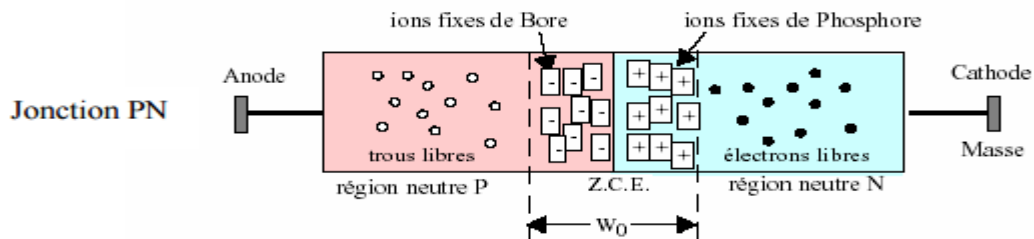


Figure 2 – 18 : La zone de charge d'espace.

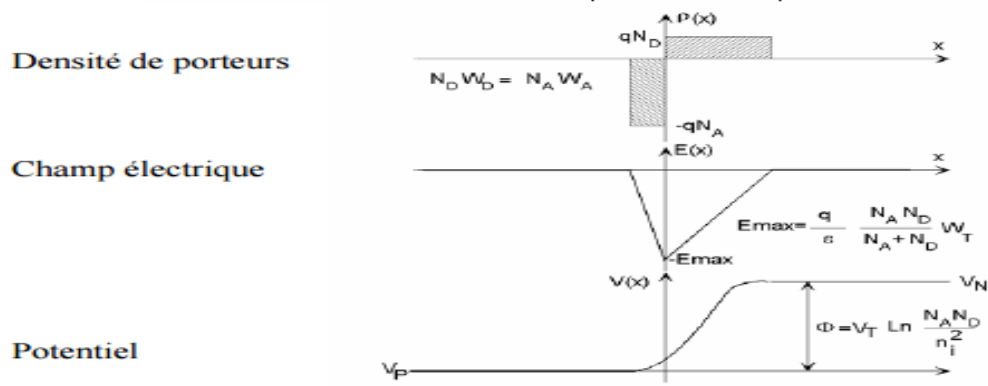


Figure 2 – 19 : Représentation d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique.

ρ : la zone de charge spatiale.

E: la courbe de champ électrique.

V : potentiel de la jonction PN.

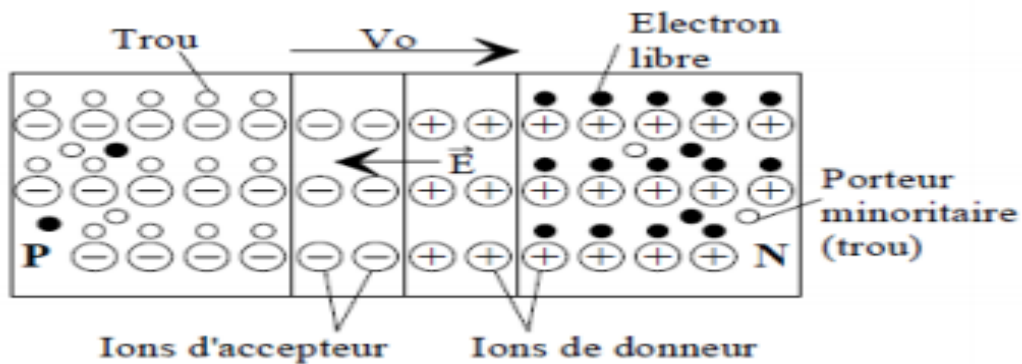


Figure 2 – 20 : Coupe transversale d'une jonction PN.

2.9.1 La jonction PN polarisée en sens inverse

Le dipôle constitué par le cristal de semi-conducteur divisé par la jonction PN est une diode dont l'anode correspond à la zone P et la cathode à la zone N. En reliant la zone P à la borne(-) d'une source de tension continue et la zone N à la borne(+), les porteurs de charges s'éloignent de la jonction et la jonction devient quasiment isolante. La diode est dite polarisée en sens inverse, le courant qui la parcourt est très faible, il est dû aux porteurs minoritaires.

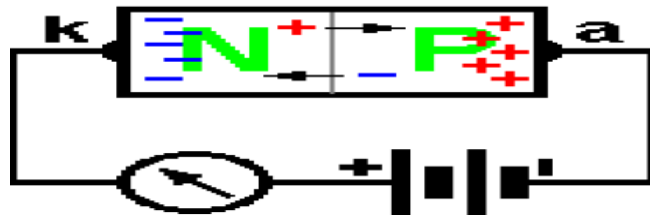


Figure 2 – 21 : Polarisation inverses.

2.9.2 La jonction PN polarisée en sens direct

En reliant l'anode de la diode (zone P) au + de la pile et la cathode (zone N) au - les porteurs de charge traversent la jonction et un courant élevé parcourt le circuit. La différence de potentiel entre les zones P et N provoquée par la source de courant continu à la zone de transition doit être suffisamment élevée pour annuler la différence de potentiel (quelques dixièmes de volts) présente dans la jonction à l'état d'équilibre.

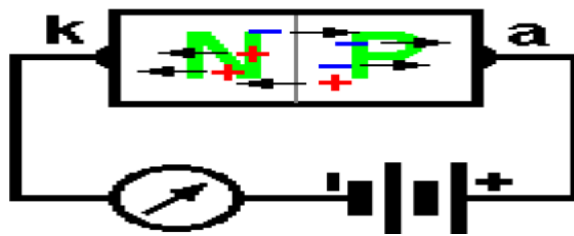


Figure 2 – 22 : polarisation direct.

2.10 Description du principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

Lorsque les photons incidents heurtent la surface du matériau photovoltaïque, il y aura une création de porteurs dans les différentes zones n, p et la zone de charge d'espace. Le comportement des photo-porteurs dépendra de la région:

- Au niveau de la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge seront renvoyés par un champ électrique soit dans la zone p pour les trous ou bien dans la zone n pour les électrons. Leur accumulation permettra de créer un photo-courant de diffusion,

- Au niveau de la zone de charge, les paires électron/trou résultantes des photons incidents seront séparées par le champ électrique, d'où les électrons vont se diriger vers la région n et les trous vers la région p. Ceci permettra de créer un photo-courant de génération.

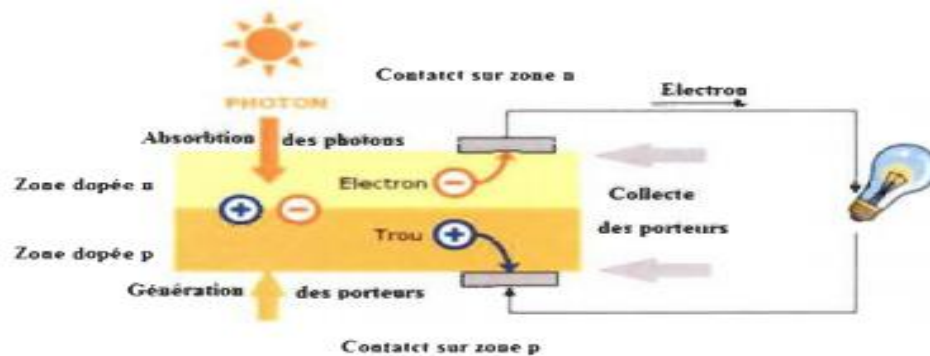


Figure 2 – 23 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

L'association du photo-courant de diffusion et le photo-courant de génération nous donnera un photo-courant I_{ph} proportionnel à l'intensité lumineuse donnée par la relation suivante:

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc}(V) \quad (2-46)$$

Où:

I_{ph} : est la densité de la photo courant généré.

I_{obsc} : est la densité de courant d'obscurité ou de diffusion.

2.11 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

2.11.1 Le modèle idéal

C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire. Il ne tient compte que du phénomène de diffusion. Le circuit équivalent de ce modèle est représenté sur la figure-2-24-, le courant est donné par la relation (2-46).

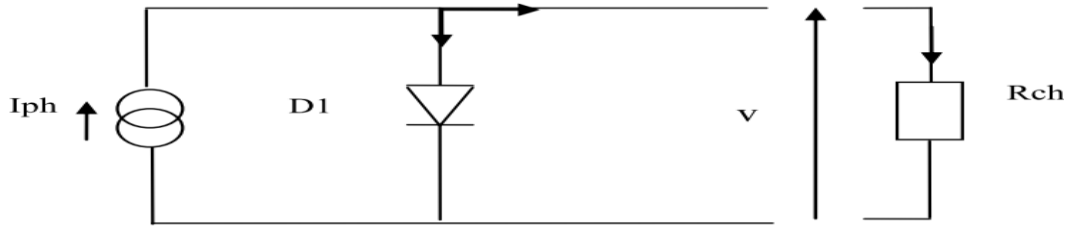


Figure 2 –24 : Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire idéale.

2.11.2 Le modèle réel

Ce modèle est celui d'une cellule solaire réelle (figure 2-25). L'expression de la caractéristique courant – tension sous éclairement s'écrit:

$$I = I_{ph} - I_1 - I_2 - I_p \quad (2-47)$$

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{q(V+IR_s)}{n_1 K_B T} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{q(V+IR_s)}{n_2 K_B T} \right) - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (2-48)$$

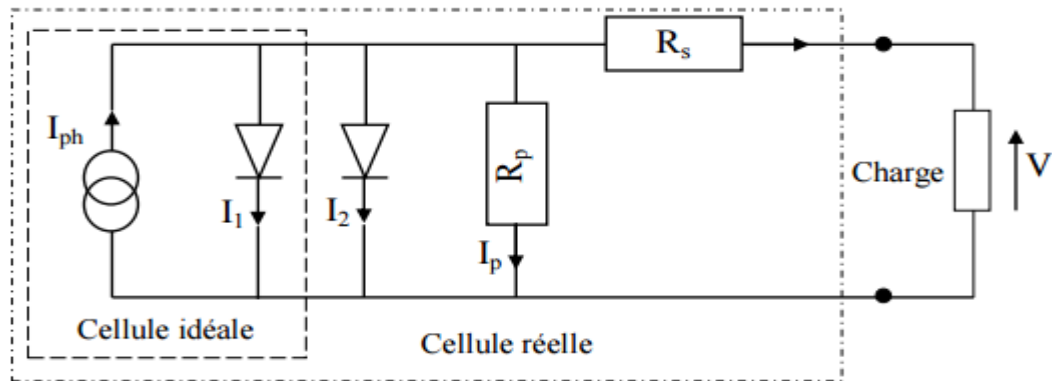


Figure 2 –25 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire est ainsi composé d'une source de courant et de deux diodes en parallèle. La source de courant modélise le courant photo-généré I_{ph} . La première diode (facteur d'idéalité $n_1 \approx 1$) correspond au courant de diffusion dans la base et l'émetteur (zones neutres). I_{s1} est le courant de saturation dû à ce phénomène.

I_2 : est le courant de génération-recombinaison où l'effet tunnel dans la zone de charge d'espace, avec I_{s2} le courant de saturation et n_2 le facteur d'idéalité de la seconde diode ($n_2 \approx 2$)

R_s : La résistance série qui modélise la résistance de la grille et les pertes résistives dans la base et l'émetteur.

R_p : La résistance parallèle (shunt en anglais) qui prend en compte les pertes et les courants de fuites dans l'émetteur et la base.

2.12 La caractéristique courant tension :

Sous obscurité, la cellule fonctionne comme une diode, elle a la même caractéristique. Sous éclairage, la caractéristique $I(V)$ de la cellule ne passe plus par l'origine des coordonnées et commence à décaler vers le bas et plus le photo courant est important plus le décalage est grand (I est grand), dans la pratique, on mesure soit le photo-courant débité par la diode, soit la photo voltage qui apparaît aux bornes de la diode. La caractéristique $I(V)$ est donnée par l'expression :

Avec :

q : est la charge élémentaire ($q = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

V :est la tension aux bornes de la jonction (V).

K_B : est la constante de Boltzmann ($K_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹).

T :est la température (°K).

La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode tandis que sous éclairage la caractéristique à l'allure présentée sur la figure (2-26).

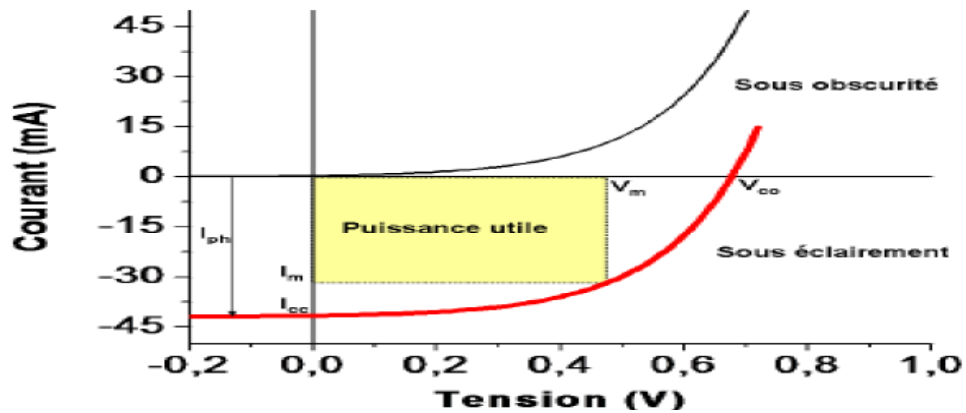


Figure 2 –26 : Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclaircissement et sous obscurité.

2.13 Paramètres de la cellule solaire

Les paramètres des cellules photovoltaïques (I_{CC} , V_{CO} , FF et η), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques.

2.13.1 Courant de court-circuit I_{CC}

Le courant de court-circuit I_{CC} est le courant qui circule à travers la jonction sous illumination sans application de tension. Il croît avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

2.13.2 Tension à circuit ouvert V_{CO} :

La tension de circuit ouvert, V_{CO} est la tension mesurée lorsqu'aucun courant ne circule dans le dispositif photovoltaïque. Elle dépend essentiellement du type de cellule solaire (jonction PN, jonction Schottky), des matériaux de la couche active et de la nature des contacts couche active-électrode. Elle dépend de plus de l'éclaircissement de la cellule. A partir

de l'expression du courant total de la cellule sous illumination, équation (2-48) dans le cas d'un courant nul, on obtient son expression :

$$V_{CO} = \frac{kT}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1\right) \quad (2-49)$$

I_S , Soit : $\frac{I_{ph}}{I_S} \gg 1$

D'où :

$$V_{CO} \approx \frac{kT}{q} \log \frac{I_{ph}}{I_S} \quad (2-50)$$

2.13.3 Le Facteur de forme FF

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement

$P_M (I_M, V_M)$ de la courbe courant-tension (courant compris entre 0 et I_{CC} et tension comprise entre 0 et V_{CO}) Figure (2-24). Ce point PM est obtenu en modifiant la valeur de la résistance externe, quand l'aire du rectangle défini par les axes Ox, Oy et les droites $x = I_m$ et $y = V_m$ passe par un maximum. Le nom "facteur de forme" (Fill Factor) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{CO} \cdot I_{CC}} = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{CO} \cdot I_{CC}} \quad (2-51)$$

est égal au rapport de la surface du rectangle P_{max} défini par la figure (2-26), sur celle du rectangle dont les cotés mesurent V_{CO} et I_{CC} . Plus ce paramètre est élevé, meilleure est l'efficacité de conversion. En dehors de ce point de fonctionnement PM particulier, la diminution du courant par recombinaison intervient à des points de fonctionnement ayant V_x supérieur à V_M et des pertes par dissipation (effet joule) des résistances séries apparaissent dans le cas $I > I_M$.

2.13.4 Le rendement η

Le rendement, η des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (2-52)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule. P_{in} est la puissance du soleil sous les conditions STC (Les conditions normalisées de test des panneaux solaires sont caractérisées par un rayonnement de 1000 W/m², un spectre solaire AM 1,5 et 25 °C de température ambiante).

2.13.5 La réponse spectrale et rendements quantiques de la cellule PV

La réponse spectrale, R_s , permet d'évaluer le rendement quantique d'une cellule en fonction de la longueur d'onde de la lumière incidente. Le principe repose sur la mesure du courant photo-généré par la cellule lors d'un éclairage monochromatique (cellule en situation de court-circuit). La longueur d'onde de cet éclairage varie de 350 nm à 1150 nm au cours de la mesure. La réponse spectrale correspond alors au rapport de la densité de courant mesurée sur la densité de la puissance incidente.

$$R_s = \frac{J(\lambda)}{P_{inc}(\lambda)} = \frac{J(\lambda)}{\phi(\lambda) \cdot S} \quad (2-53)$$

S : surface frontale de la cellule

Le rendement quantique externe de la cellule RQE (EQE:en anglais External Quantum Efficiency) est ensuite directement déduit de cette mesure par la Relation (2-54).Il correspond au pourcentage d'électrons qui participent au courant photo-généré par rapport au nombre de photons incidents.

$$RQE = \frac{hc}{q\lambda} RS(\lambda) \quad (2-54)$$

Avec la mesure de réflectivité, R, il est possible de connaître le rendement quantique

interne, RQI(IQE:en anglais Internal Quantum Efficiency), correspondant au pourcentage d'électrons participants au courant photogénéré par rapport au nombre de photons qui ont été réellement absorbés dans la cellule :

$$RQI = \frac{RQE(\lambda)}{1-R(\lambda)} \quad (2-55)$$

Les photons de faibles longueurs d'onde (UV) étant absorbés en face avant de la cellule, l'étude la mesure de l'IQE aux faibles longueurs d'onde donne une indication de la qualité de la face avant (passivation de surface et émetteur). Les photons de fortes longueurs d'onde (IR) étant plutôt absorbés en face arrière, la valeur de l'IQE aux fortes longueurs d'onde renseigne sur la passivation de cette face arrière.

Où

$J_{ph}(\lambda)$: est la densité de courant collectée à la longueur d'onde λ (A/cm^2).

$\phi(\lambda)$: est le flux des photons incidents pour chaque longueur d'onde ($W.cm^{-2}$)

q: la charge électronique

2.13.6 La Résistance carrée

La technique conventionnelle pour mesurer la résistance carrée R_{sheet} des régions dopées est la méthode dite des 4 pointes.

Pour éviter de prendre en compte la résistivité de la base, la mesure des régions dopées de type P⁺ a été faite sur une base de type N tandis que les régions dopées de type N⁺ ont été mesurées sur une base de type P. La résistance carrée permet de donner une première indication sur le profil de la jonction.

En effet, celle-ci s'exprime en fonction du profil de concentration en dopants actifs N(x) ainsi que de la mobilité des porteurs $\mu_n(x)$ et $\mu_p(x)$. Dans le cas où la région dopée contient

majoritairement des électrons (jonction n⁺/p), la résistance carrée est obtenue par la relation (2-56) avec x_j la profondeur de jonction.

$$R_{\text{sheet}} = \frac{1}{q \int_0^{x_j} \mu_n(x) N(x) dx} \quad (2-56)$$

2.13.7 La résistivité

La méthode développée par Berger [166] a été utilisée pour mesurer la résistivité spécifique de contact, ρ_c , entre les lignes de métallisation et l'émetteur (ou BSF) de la cellule. Cette mesure est réalisée sur une bande de largeur w , généralement égale à 1 cm, découpée dans la cellule et comprenant au moins quatre lignes de métallisation (Figure 2-25). Le principe repose sur la mesure de trois couples de tension/courant (U_i/I_i) effectuée dans les trois configurations illustrées sur la Figure 2-25.

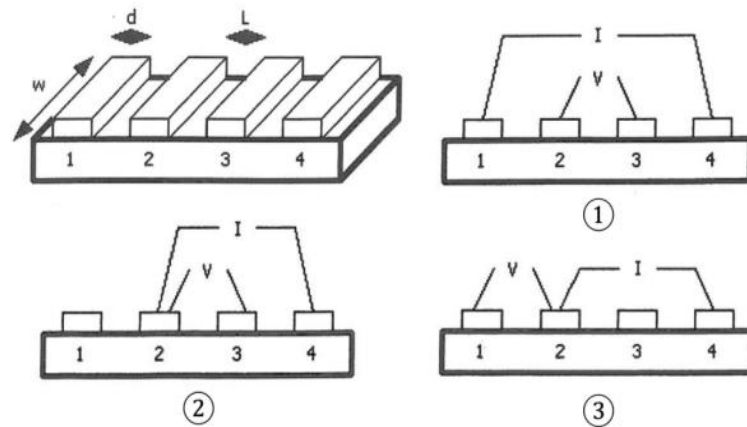


Figure 2 –27 :Configuration des trois mesures à réaliser pour déterminer la résistivité de

Contact.

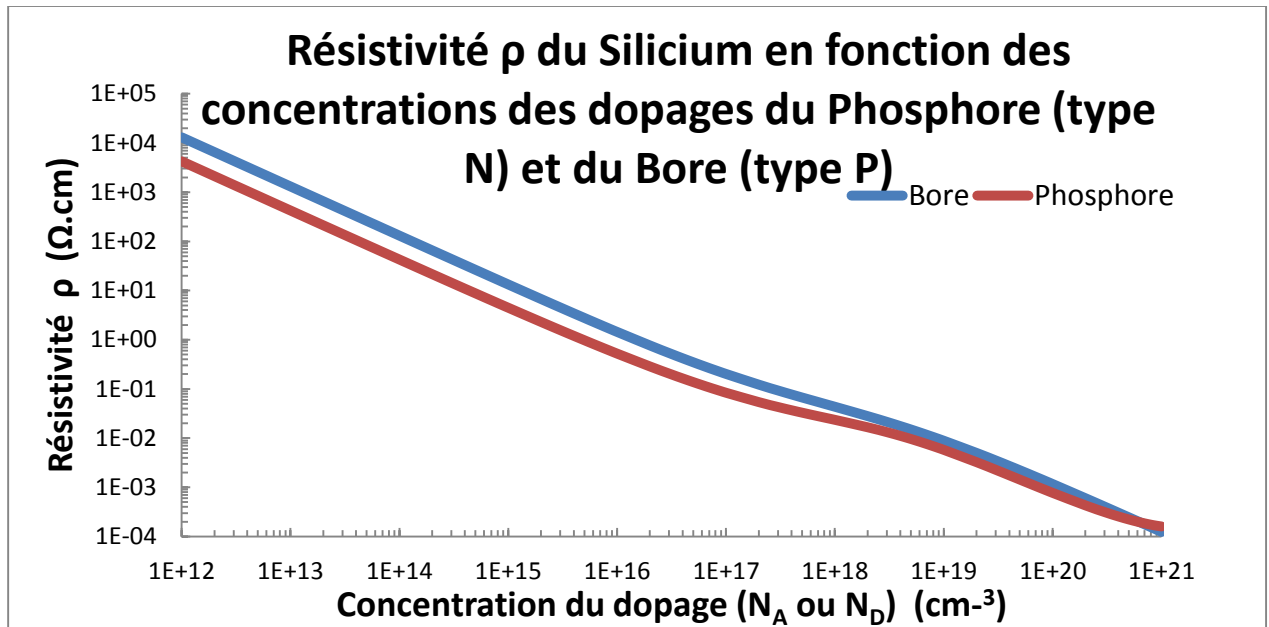


Figure 2 –28 : Variation de résistivité en fonction de la concentration du dopage.

2.14 Les Pertes physiques et technologiques :

2.14.1 Les Pertes physiques

2.14.1.1 Les Pertes par les photons de grande longueur d'onde :

Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ($\lambda > \lambda_g$) ne peuvent générer de paire électron/trou et sont donc perdus.

2.14.1.2 Les Pertes dues à l'énergie excédentaire des photons

Un photon absorbé génère seulement une paire électron/trou. L'excès d'énergie, supérieur à la largeur de la bande interdite, est principalement dissipé sous forme de chaleur.

2.14.1.3 Le Facteur de tension

C'est le rapport de la tension maximale développée par la cellule (V_{OC}) par la tension de gap $\frac{E_g}{q}$. La tension aux bornes d'une cellule n'est qu'une fraction de la tension de gap à cause notamment de la chute de potentiel au niveau des contacts et de la jonction.

2.14.2 Les Pertes technologiques

2.14.2.1 La Réflectivité

Une partie de l'énergie incidente est réfléchiée par la surface (non métallique) de la cellule. Le coefficient de réflexion R peut être optimisé par la mise en œuvre de traitements de surface adéquats et de couche antireflet.

2.14.2.2 Le Taux d'ombrage

Les contacts métalliques (de surface S-métal) présents sur la face avant afin de collecter les porteurs entraînent des pertes de puissance puisqu'ils couvrent une partie de la surface S de la cellule. Le taux d'ombrage est un compromis entre les pertes dues à la couverture partielle de l'émetteur par les contacts et les pertes de facteur de forme provoquées par la résistance série, liée à la largeur de la métallisation.

2.15 Les constituants de base d'une cellule photovoltaïque

2.15.1 Passivation des faces avant et arrière

La surface des semi-conducteurs contient une densité importante de défauts (liaisons pendantes, impuretés, etc.) entraînant des pertes non négligeables liées à la recombinaison en surface. La passivation consiste à améliorer les qualités électroniques de la surface et du volume du matériau en neutralisant les effets de ses défauts électriquement actifs. Diverses couches de passivation sont utilisées en photovoltaïque mais les principales sont l'oxyde thermique de silicium (SiO_2) et le nitrure de silicium hydrogéné ($\text{SiN}_x\text{:H}$).

2.15.2 Couche antireflet

Pour minimiser la réflexion de la lumière, une couche antireflet (CAR) est utilisée. Le principe d'action des couches antireflet est basé sur l'interférence des faisceaux lumineux dans les couches diélectriques minces (voir insertion sur la figure 2-29). Si l'épaisseur de la couche diélectrique est égale à :

$$d_{CAR} = \frac{(2.N+1).\lambda}{4.n_{CAR}} \quad N=0, 1, 2,3 \quad (2-57)$$

on obtiendra l'annulation des faisceaux réfléchis à l'interface air/CAR et CAR/semi-conducteur. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, une double couche antireflet est utilisée (avec deux diélectriques différents). Différentes CAR sont utilisées en photovoltaïque : TiO₂, SiO₂, ZnS, MgF₂, SiN_x, etc.

Tableau 10 - Différentes CAR utilisées en photovoltaïque : TiO₂ , SiO₂ , ZnS, MgF₂ , SiN_x

Types des couches CAR	Indice de réfraction
TiO ₂	2,5
SiO ₂	1,58
ZnS	2,36
MgF ₂	1,25
SiN _x	1,99

2.15.3 Texturation de la surface

La texturation du silicium est utilisée pour diminuer la réflectivité de la surface de la cellule. Cette opération vise à développer en surface un relief micrométrique, généralement de forme pyramidale. La longueur d'onde de la lumière incidente étant inférieure aux dimensions des structures ainsi réalisées, les rayons incidents suivent les lois de l'optique géométrique. L'insertion sur figure (2-29) présente le principe de réflexions multiples propre à la texturation. Le relief de la surface entraîne une baisse de la réflexion en face avant : un rayon arrivant à incidence normale (par rapport au plan de la cellule) sur une pyramide sera réfléchi sur la face d'une pyramide adjacente, cette double réflexion sur les pyramides diminue le coefficient de réflexion totale, qui ne vaut plus R mais R^2 . D'autre part, un rayon d'incidence normale sera transmis dans la cellule avec un angle de réfraction θ différent de 0° . Le trajet de ce rayon au sein du silicium sera donc augmenté d'un facteur $1/\sin\theta$ par rapport au cas d'une surface plane et perpendiculaire à l'éclairement, ce qui aura pour effet d'augmenter la part de photons absorbés par le matériau. Pour finir, la texturation de la surface entraîne un piégeage plus important de la lumière pénétrant dans la cellule. Sur la face arrière de la cellule, il existe un angle d'incidence critique θ_c à partir duquel le rayon est totalement réfléchi et prolonge son trajet au sein du semi-conducteur, augmentant là aussi l'absorption des photons. En appliquant la loi de Descartes, on trouve que cet angle vaut 17° dans le cas du silicium dans l'air. Ce phénomène est particulièrement important dans le cas des cellules de faible épaisseur, et peut être renforcé par une texturation de la face arrière et/ou une couche antireflet sur cette même face. Différents procédés sont utilisés pour texturer la surface du silicium : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides, texturation mécanique (laminage à froid sous un peigne dentelé), texturation laser.

2.15.4 Contacts face avant et arrière

Les contacts métalliques à l'émetteur et au substrat servent à collecter le courant de porteurs photo générés. Les contacts doivent être ohmiques, c'est-à-dire que la caractéristique $I=f(V)$ du contact doit être linéaire. La résistance des contacts est un paramètre très important. La forte résistance des contacts augmente la résistance série de la cellule et baisse le facteur

de forme et le rendement. Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles en silicium multi cristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la pulvérisation cathodique ou l'évaporation sous vide sont utilisées.

2.15.5 Le champ électrique arrière

Le champ électrique arrière (BSF : Back Surface Field) consiste à créer une barrière de potentiel (par exemple, jonction p+/p) sur la face arrière de la cellule pour assurer une passivation. La barrière de potentiel induite par la différence de niveau de dopage entre la base et le BSF tend à confiner les porteurs minoritaires dans la base (voir l'insertion sur la figure 2-29). Ceux-ci sont donc tenus à l'écart de la face arrière qui est caractérisée par une vitesse de recombinaison très élevée. Le BSF fait encore l'objet de nombreuses recherches car l'épaisseur des plaques est constamment réduite afin de réaliser une économie de matière première et le silicium multi cristallin présente désormais des longueurs de diffusion des porteurs minoritaires élevées (environ 200 μm).

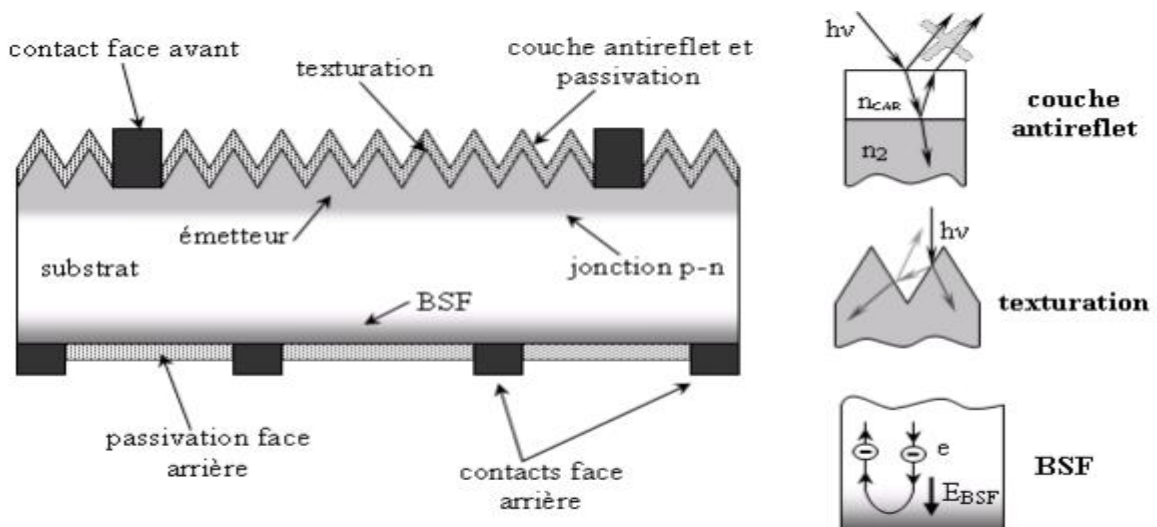


Figure 2 – 29 : Composition d'une cellule photovoltaïque.

Chapitre 3

Techniques de dopage

3.1 Introduction

Comme vu précédemment, le dopage des semi conducteurs se réalise par la substitution d'un atome du réseau cristallin par un autre atome donneur (exemple phosphore) ($1 e^-$ supplémentaire) ou accepteur (exemple bore) ($1 h^+$ supplémentaire).

Cette substitution se fait au cours de l'élaboration du lingot semi-conducteur et est donc obtenue de façon généralement homogène sur tout le volume de matériau fabriqué.

Pour obtenir un dopage limité à une zone réduite, il faut faire recours à des méthodes de dopage post-croissance. Les zones de dopage correspondent à des fenêtres obtenues par masquage. Deux méthodes de dopage post -croissance sont principalement utilisées :

- La diffusion thermique
- L'implantation ionique

3.2 La diffusion thermique

3.2.1 Historique

C'est en 1855 que les bases théoriques des phénomènes de diffusion ont été établies par Fick: elles expriment, au même titre qu'un flux de chaleur ou qu'une densité de courant électrique, un flux d'atomes dans une direction donnée du cristal. On est amené ainsi à définir une grandeur physique importante, appelée le coefficient de diffusion. Ce coefficient intervient dans deux lois fondamentales, appelées lois de Fick.

3.2.2 La diffusion dans le silicium

La diffusion du dopant dans le silicium est une technologie importante en tant qu'étape de processus élémentaire dans la fabrication d'une cellule photovoltaïque à base de silicium. Le profil de dopage dépend comme son nom l'indique essentiellement de la température et de la durée de diffusion. La température de diffusion dans le silicium se situe entre 800 et 1500 °C. On peut admettre que les mécanismes fondamentaux, par lesquels diffusent les dopants, sont assez bien compris et pris en compte dans les simulateurs de procédés de fabrication. Nous proposons de rappeler les notions nécessaires et indispensables à la compréhension de la théorie générale de la diffusion des dopants dans le silicium dans le but de prédire et contrôler les profils de dopage.

3.2.3 Les lois de la diffusion

a) Première loi de Fick

Le transfert de chaleur par conduction s'explique également par des mouvements moléculaires aléatoires, et il ya une analogie évidente entre les deux processus. Considérons le flux F unidimensionnel (x -direction) de particules diffusantes d'une certaine espèce. Les particules peuvent être des atomes, des molécules, ou des ions. La première loi de Fick est exprimée dans un milieu isotrope par le flux. Le flux est défini par le nombre d'atomes d'impuretés qui traversent une unité d'aire par unité de temps ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$). Dans la première approche, F est proportionnel au gradient de la concentration $C(x,t)$ d'atomes de dopage par unité de volume (cm^{-3}) :

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (3-1)$$

Où D est le coefficient de diffusion, ou diffusivité. Il s'exprime alors en $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$. Le signe moins indique que, physiquement, le flux d'atomes va en sens inverse du gradient $\frac{\partial C}{\partial x}$.

La première loi de Fick en trois dimensions

La première loi de Fick se généralise facilement à trois dimensions en utilisant la notation suivante :

∇ : est l'opérateur Laplacien.

Où

∇C : exprime l'application de l'opérateur Laplacien (∇) sur le champ de concentration $C(x,y,z,t)$ et le produit de champ à gradient de concentration ∇C .

On peut écrire l'équation (3-2) de façon suivante:

$$F = -\left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} + D_y \frac{\partial C}{\partial y} + D_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) \quad (3-2)$$

Où

D_x, D_y, D_z : le coefficient de diffusion suivant la direction x,y,z respectivement

Si D est une constante quel que soit la direction dans l'espace (milieu isotrope), on peut écrire

$$F = -D\left(\frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial C}{\partial y} + \frac{\partial C}{\partial z}\right) \quad (3-3)$$

Le coefficient de diffusion D ($cm^2.S^{-1}$) s'exprime en fonction de la température T ($^{\circ}K$) par la relation suivante :

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (3-4)$$

Ou :

D_0 est considéré comme une constante et est appelé le facteur de fréquence.

ΔE est l'énergie d'activation du phénomène de diffusion.

Le Tableau III-3 donne les valeurs typiques de ces coefficients pour les éléments dopants les plus utilisés dans le silicium.

Tableau 11 – Valeurs typiques du coefficient de diffusion et d'énergie d'activation pour les dopants de silicium les plus fréquents

Dopant	Phosphore (P)	Bore (B)	Arsenic (As)	Antimoine (Sb)	Aluminium (Al)
$D_0 (cm^2.s^{-1})$	2,53	7,87	68,6	12,9	4,73
$\Delta E (eV)$	3,61	3,73	4,23	3,98	3,35

La figure présente les variations des coefficients de diffusion intrinsèque en fonction de la température.

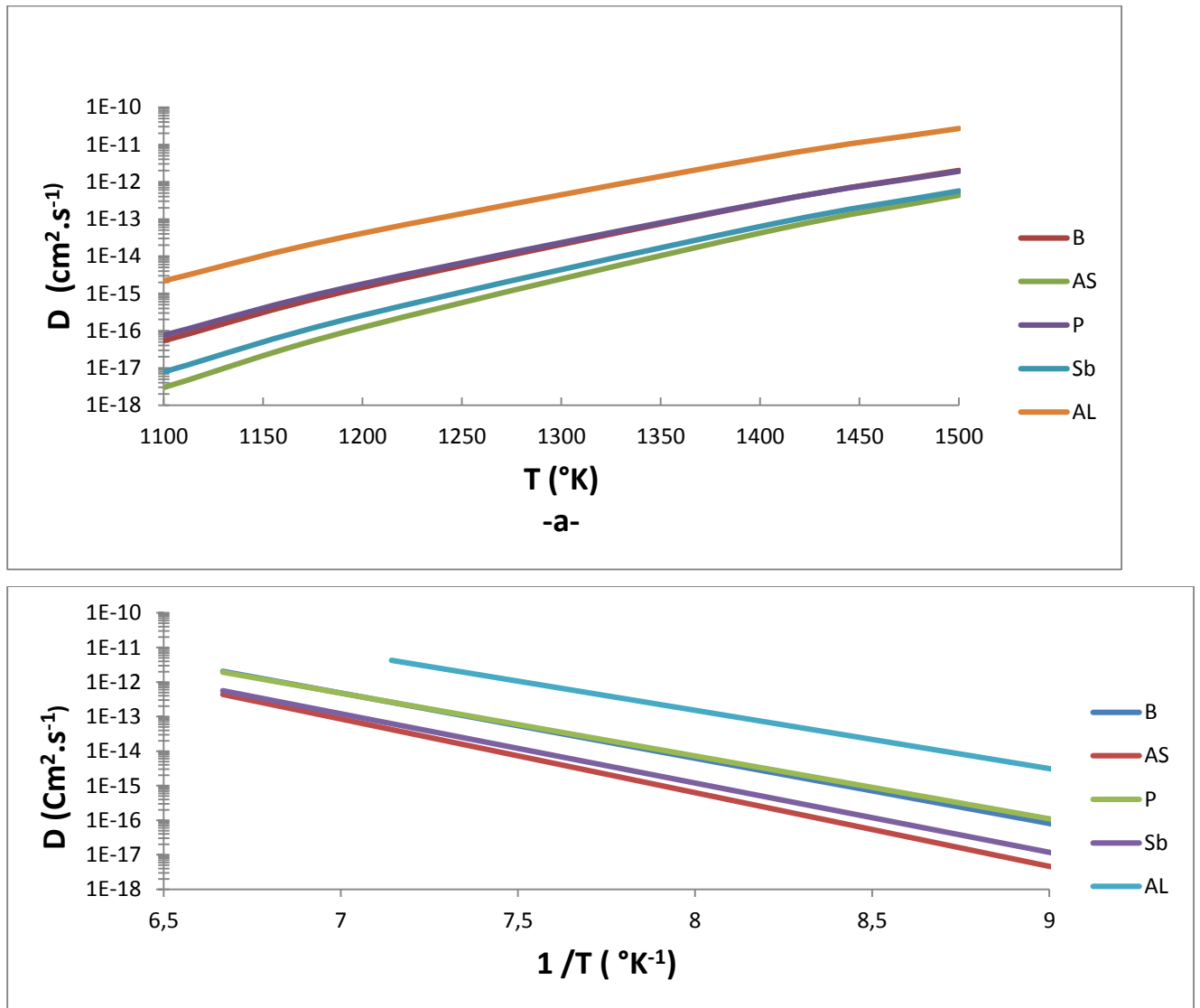


Figure 3– 1: Coefficients de diffusion intrinsèque des principaux dopants utilisés en microélectronique : **a.** En fonction de la Température. **b.** En fonction de l'inverse de la température.

b) Deuxième loi de Fick

Aussi appelée équation de la diffusion, la seconde équation de Fick exprime en tout point x la variation temporelle de la concentration $C(x,t)$ en fonction de sa variation spatiale au voisinage de ce point. La première équation de Fick est utilisée en régime permanent seulement, c'est-à-dire lorsque le flux de particules ne dépend pas du temps.

La deuxième loi de Fick exprime non plus un régime permanent de diffusion, mais un régime transitoire où l'on suppose $\frac{\partial C}{\partial x} \neq 0$. La variation de la concentration en fonction du temps peut être définie par la relation :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x} \quad (3-5)$$

La deuxième équation de Fick décrit comment le changement dans la concentration dans un élément de volume est déterminé par le changement dans le flux entrant et le flux sortant dans le volume (figure 3-2)

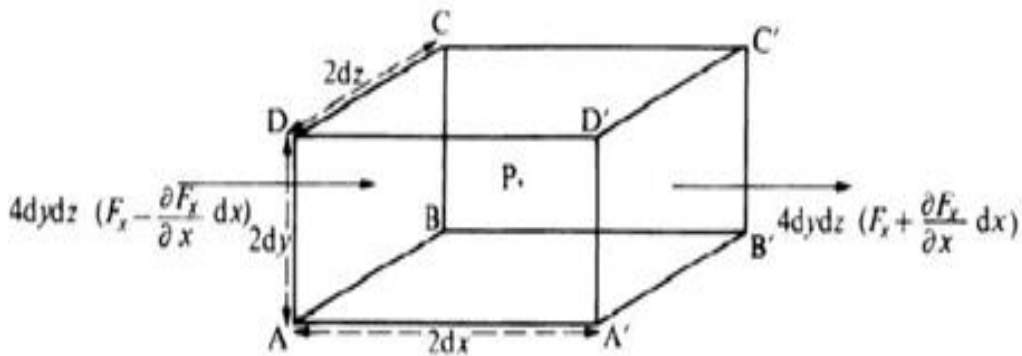


Figure 3-2 : Principe de diffusion-système conservatif

3.2.4 Les mécanismes de diffusion

a) Le mécanisme interstitiel

Dans le cas d'un mécanisme interstitiel, l'impureté diffuse de site interstitiel en site interstitiel (figure 3-3). C'est un mécanisme de diffusion rapide. L'impureté peut donc parcourir de grandes distances. Dans ce mécanisme l'impureté ne crée pas de liaison de valence avec le réseau et ne participe donc pas à l'apport de charge dans ce dernier. On peut

toutefois assister à une formation de complexes (phosphores dans le cas cette diffusion) dans le réseau. Ces complexes peuvent alors ralentir le mécanisme de diffusion.

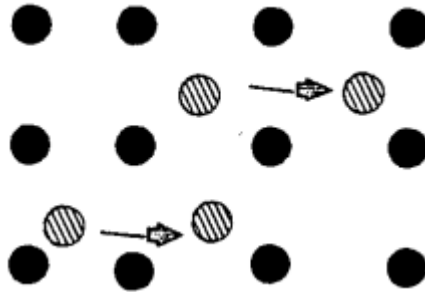


Figure 3– 3 : Mécanisme de diffusion interstitiel

b) Le mécanisme substitutionnel

Dans le cas d'un mécanisme substitutionnel, les impuretés occupent des sites du réseau cristallin (figure 3-4). Il s'agit d'une diffusion plus lente. On dénombre deux types de mécanismes substitutionnels : le mécanisme lacunaire et l'auto-interstitiel. Dans les deux cas, l'impureté établit des liaisons covalentes avec le réseau et apporte son excès (type N) ou son déficit de charge (type P).

- a. Le mécanisme lacunaire : Dans ce mécanisme, une lacune doit arriver au voisinage de l'impureté, qui prend sa place (figure 3-5.a).
- b. Le mécanisme auto-interstitiel : Le mécanisme auto-interstitiel (figure 3-5.b) est un peu plus compliqué, il peut être décrit ainsi :

b1. L'impureté se substitue à un atome du réseau et l'un des atomes du réseau se trouve dans un site interstitiel proche de l'impureté.

b2. L'atome du réseau en position interstitiel prend la place de l'impureté qui occupe alors un site interstitiel en restant liée au réseau.

b3. L'impureté diffuse tout en restant liée au réseau.

b4. L'impureté repasse en position de substitution.

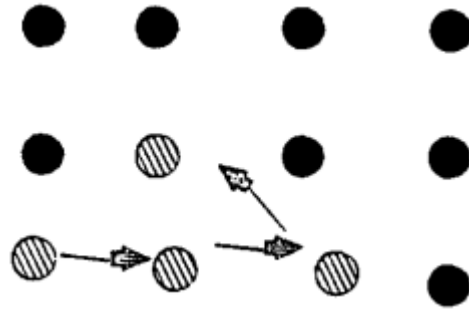


Figure 3- 4 : Mécanisme de diffusion substitutionnel

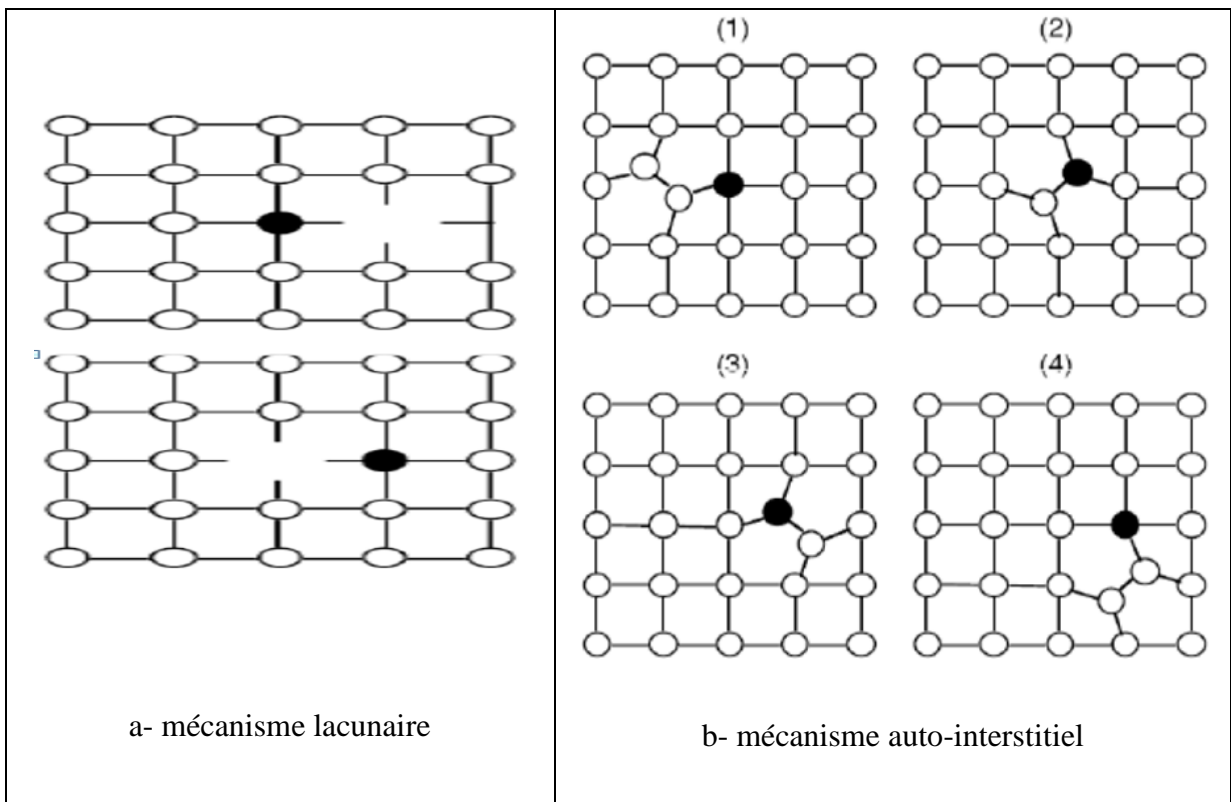


Figure 3- 5 : Les types des mécanismes substitutionnels

a- le mécanisme lacunaire b-l'auto-interstitiel

3.2.5 Résolution des équations de Fick :

Il est possible d'estimer la concentration d'impuretés en chaque point du matériau selon le temps de diffusion. Pour cela il faut combiner les deux équations de Fick. Le résultat obtenu est appelé profil de concentration ou profil de dopage. La résolution de ces équations nécessite une résolution numérique en imposant une condition initiale et deux conditions aux limites.

➤ Diffusion de dopants à partir d'une source infinie :

Dans ce modèle, la source d'impuretés est infinie. On considère alors la concentration d'impuretés à la surface du matériau comme constante. Elle est égale à la solubilité limite de l'impureté à la température de travail.

Tableau 12 – Résolution des équations de Fick dans le cas d'une source infinie de dopants.

	Enoncé	Equation
1 ^{ère} condition	La concentration d'impureté en surface est constante, elle égale à C_s . On néglige le régime transitoire.	$\left. \frac{\delta C}{\delta x} \right _{(0,t)} = 0$
2 ^{ème} condition	La concentration à grande distance est nulle pendant toute la diffusion.	$C(\infty,t)=0$
le profil de concentration initial est égale à	On considère qu'à l'instant initial, la concentration dans tout le matériau est nulle.	$C(x,t)=0$
Solution	$C(x,t) = C_s \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$ <p>Avec $2\sqrt{Dt}$ la profondeur de diffusion, elle correspond à 90% des impuretés ayant diffusées.</p>	

➤ Diffusion à partir d'une source constante de dopants :

$$Q = \int_0^{\infty} C(x) dx \quad (3-6)$$

Cette quantité Q correspond à celle qu'on a préalablement déposée à partir d'une source infinie pendant un temps t. La concentration initiale de dopant s'écrit :

$$C(x) = C_S \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (3-7)$$

En combinant les deux équations précédentes, on obtient :

$$Q = \frac{2}{\sqrt{\pi}} C_S \sqrt{Dt} \quad (3-8)$$

Il est alors possible de calculer d'estimer le profil de dopage durant cette seconde diffusion en résolvant la deuxième loi de Fick :

Tableau 13 – Résolution des équations de Fick dans le cas d'une source constante de dopants.

	Enoncé	Equation
1 ^{ère} condition	Le gradient de concentration est nul en surface	$\left. \frac{\delta c}{\delta x} \right _{(0,t)} = 0$
2 ^{nde} condition	La concentration à grande distance est nulle pendant toute la diffusion	$C(\infty, t) = 0$
Instant initial	le profil de concentration initial est égale à	$C(x, t) = \operatorname{erfc}\left(-\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$
solution	$C(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$	(3-9)

La théorie de la diffusion prédit des profils de concentration de type gaussien (équation 3-9). L'observation physique des profils de dopage démontre des écarts à la théorie parfois très importants. Il existe donc d'autres paramètres influents sur la diffusion.

Le profil final de dopant ayant diffusé dans le silicium est fortement conditionné par les paramètres technologiques reliés à la surface. On obtient, par exemple, des profils très

différents lorsque la concentration de surface est faible ou très forte. Concentration de surface est faible ou très forte.

Dans tous les cas, le paramètre important responsable de l'accélération ou du ralentissement de la diffusion des dopants, est la concentration locale de défauts ponctuels incorporés lors de la diffusion du dopant.

La figure (3.6) représente, pour le phosphore, des profils de concentration pour différentes durées de la diffusion à C_s et T constant en fonction de la profondeur(x).

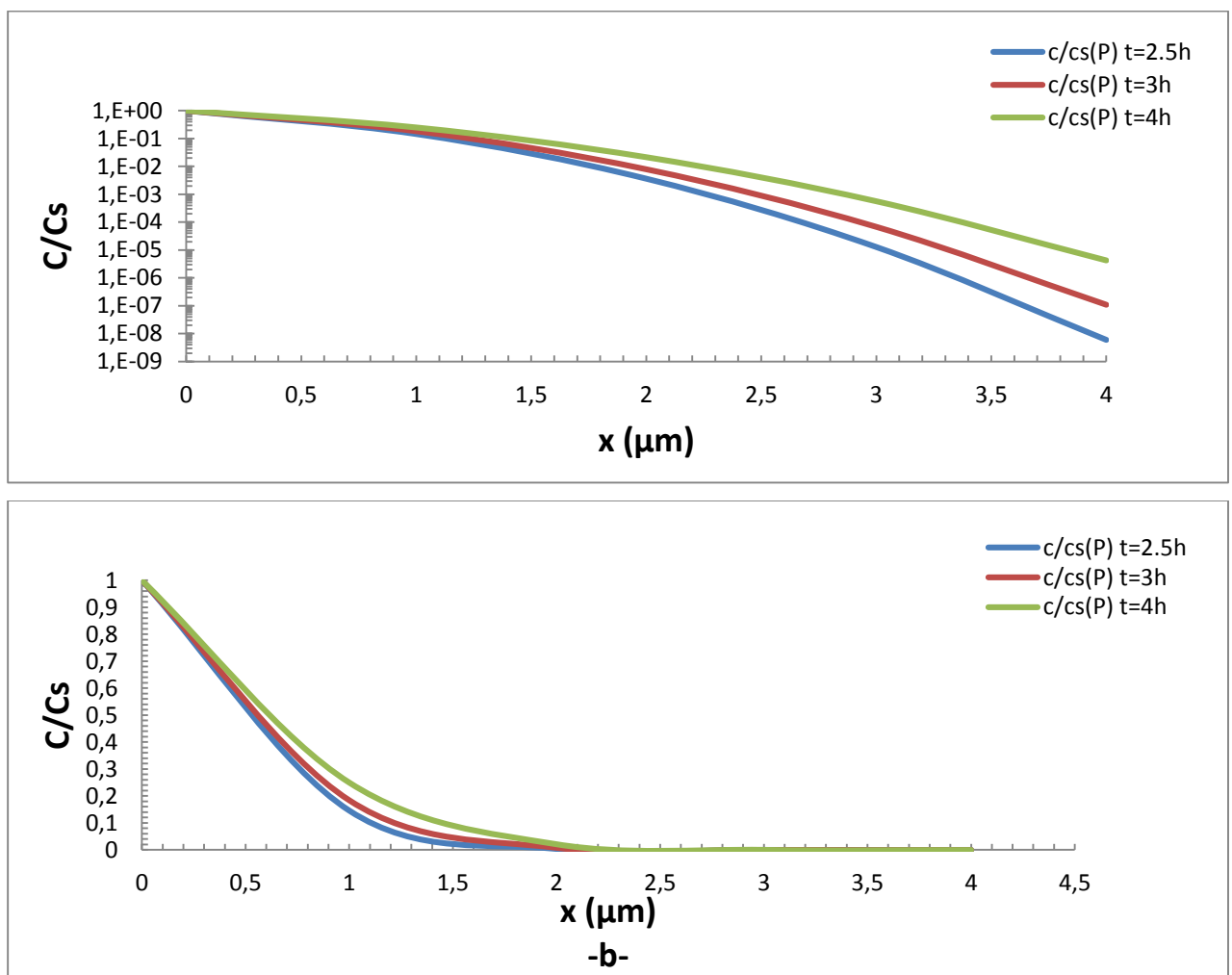


Figure 3 – 6: Profils de concentration en dopants pour différentes durées de la diffusion à C_s constante : a-Échelle logarithmique b- Échelle linéaire.

3.2.6 Procédés de diffusion

➤ A partir de sources gazeuses

Les sources gazeuses sont les gaz tels que l'Arsine AsH_3 , la phosphine PH_3 ou le diborane B_2H_6 . Notons qu'une circulation en permanence d'un gaz neutre (azote), permet d'éviter toute pollution par des éléments venant de l'atmosphère ambiante. Cet azote doit être très pur aussi afin de ne pas polluer le four.

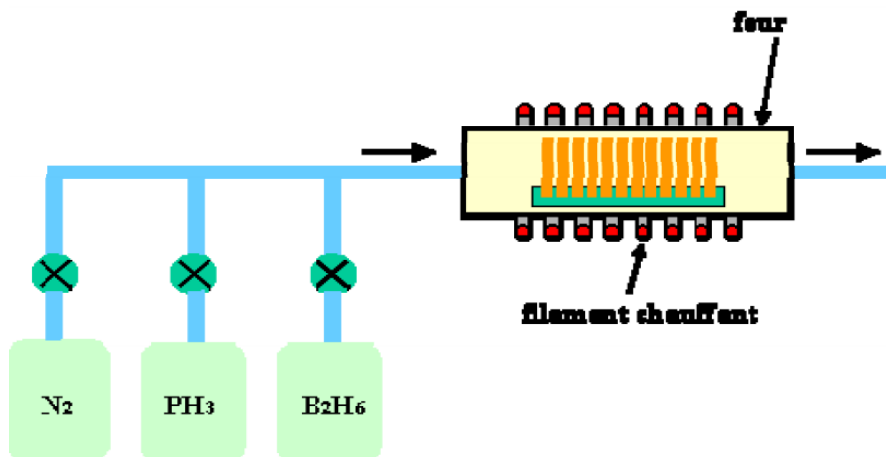


Figure 3– 7 : Diffusion dans un four à partir de sources gazeuses. Les gaz dopants sont entraînés par un gaz porteur neutre, tel que l'azote

➤ A partir de sources liquides

Bien qu'a priori, les gaz de dopage soient simples à mettre en œuvre, ils sont par contre très dangereux pour l'homme à même quelques ppm de concentration. On préfère donc, utiliser des sources liquides telles que $POCl_3$ ou BBr_3 qui sont liquides à température ambiante mais facilement vaporisées pour être introduites dans les fours de diffusion.

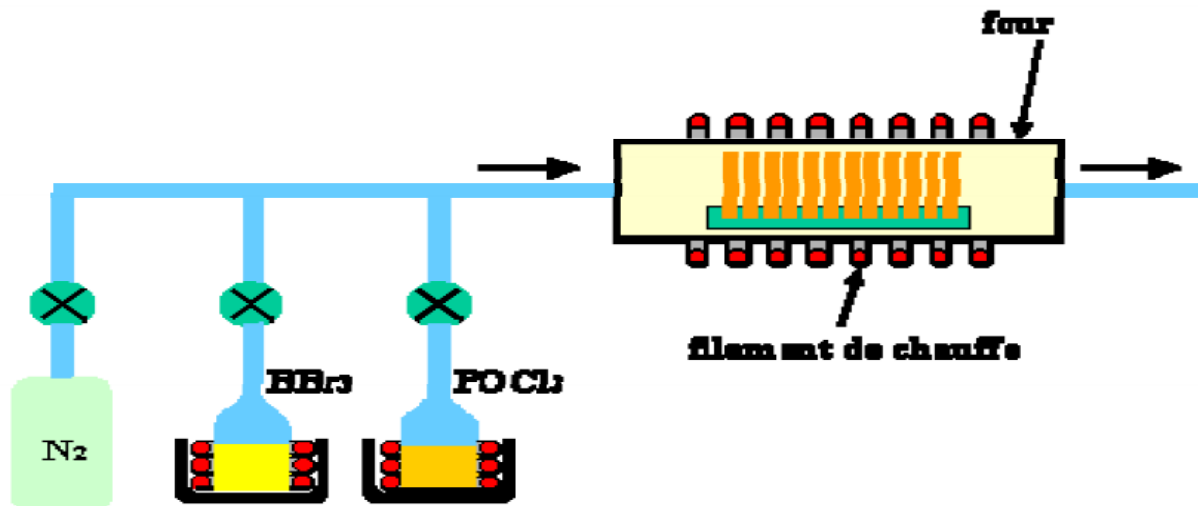


Figure 3 – 8 : Diffusion à partir de sources liquides. Les ballons contenant les liquides sont chauffés pour vaporiser le liquide afin de le faire pénétrer dans le four.

➤ A partir de sources solides

On peut aussi utiliser des sources solides, tel que, les verres contenant les dopants niture de bore ou verre dopé au phosphore.

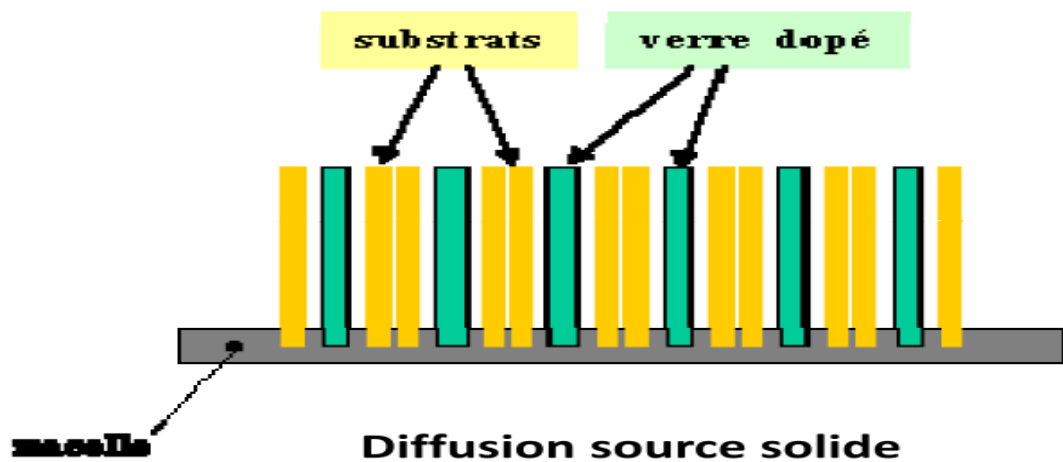


Figure 3– 9 : Procédé de dopage à partir de sources solides. Les plaquettes de verre dopé permettent de réaliser un dépôt sur les substrats montés sur une nacelle (ou port échantillons).

3.3 L'implantation ionique

3.3.1 Historique

L'implantation ionique est une technique de dopage sélectif du matériau semi-conducteur dont les principes de base ont été élaborés en 1954 par Schottky . Cette méthode a connu des développements et des améliorations considérables dans les années 1960.

L'implantation ionique est une méthode d'introduction volontaire d'impuretés dans un matériau, utilisée depuis plusieurs décennies dans le domaine de la microélectronique et qui a fait progressivement depuis quelque temps au niveau recherche son apparition dans celui du solaire photovoltaïque. La première technique d'implantation ionique qui a été utilisée est celle par faisceau d'ions.

3.3.2 Les mécanismes d'implantation

Dans la cellule solaire cette technique est utilisée dans l'élaboration de l'émetteur de la cellule photovoltaïque ainsi que dans le cas de la formation du champ en surface arrière (BSF ; Back Surface Field en anglais) ou sur la face avant (FSF ; Front Surface Field en anglais).

La formation d'une couche dopée par implantation ionique s'effectue en deux étapes. Tout d'abord durant la première, l'espèce dopante à implanter (bore, phosphore, arsenic....) est vaporisée, ionisée, accélérée puis introduite dans le matériau cible à l'aide d'un implanteur ionique. Une fois dans le matériau, l'énergie cinétique de l'ion chute progressivement du fait de ses différentes collisions et interactions avec les atomes du matériau, tel qu'indiqué sur la figure (3–10). Ces collisions résultent en un déplacement des atomes du matériau hors de leurs sites cristallographiques et en la création de défauts, qui conduisent à un endommagement, voire à une amorphisation du matériau cible. L'atome implanté se retrouve, en fin de course, en position intersertitielle, inactif électriquement.

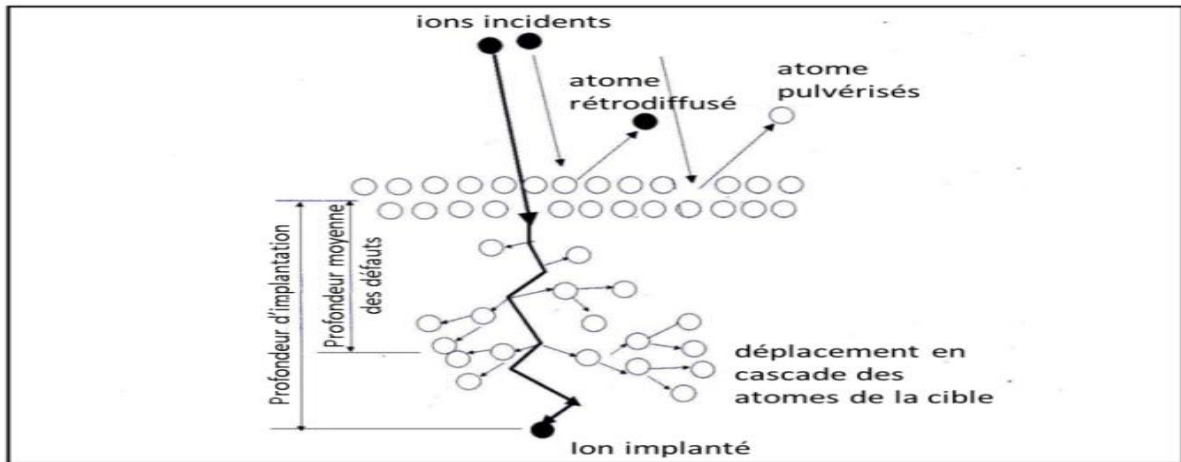


Figure 3 – 10 : Schéma montrant les différents phénomènes pouvant se produire dans une cible soumise à l'implantation ionique.

3.3.3 Le recuit thermique

Réparer le matériau cible en éliminant une très grande partie des défauts cristallographiques créés lors du processus d'implantation, et d'activer les dopants implantés, d'autre part, les substrats implantés sont ensuite recuits par voie thermique, laser ou micro-ondes. On parle souvent de recuit d'activation puisque les dopants vont passer en position substitutionnelle dans la maille et devenir actifs électriquement. Cependant, lorsque la quantité d'atomes implantés dépasse la limite de solubilité, tous les atomes ne peuvent pas être activés et des précipités peuvent apparaître. Le recuit thermique est la voie généralement privilégiée et réalisée dans un four en quartz tel que ceux utilisés pour les oxydations thermiques. Des recuits sous atmosphère neutre (N_2) à des températures de l'ordre de 800 à 1100°C sont généralement nécessaires.

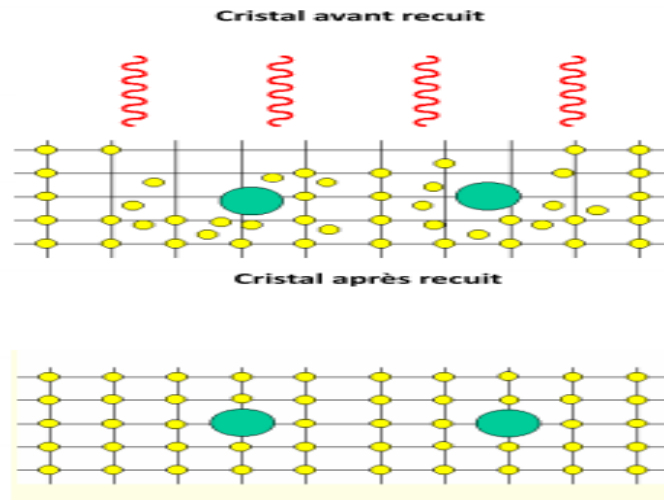


Figure 3 – 11 : Schéma montrant le cristal avant et après recuit thermique.

3.3.4 Principe des implantateurs ioniques

Le principe de fonctionnement d'un implantateur est schématisé sur la figure (3-12). L'implantation consiste à ioniser les atomes de l'impureté choisie, à accélérer les ions par un champ électrique de grande énergie (jusqu'à 500 KeV) et à les faire pénétrer dans les régions exposées de la structure (non protégées par un masque). Les ions sont générés à partir de sources solides, liquides ou gazeuses (type de plasma). Elles émettent toujours des quantités non négligeables d'ions d'autres éléments que l'impureté requise. La sélection des ions «utiles» se fait donc grâce à un champ magnétique qui sélectionne les ions par le rapport masse sur charge. Les ions sont alors accélérés à l'énergie d'implantation souhaitée puis le faisceau d'ion est mis en forme par des lentilles électrostatiques. Un dispositif de balayage en x et y permet d'assurer une implantation uniforme sur la surface désirée.

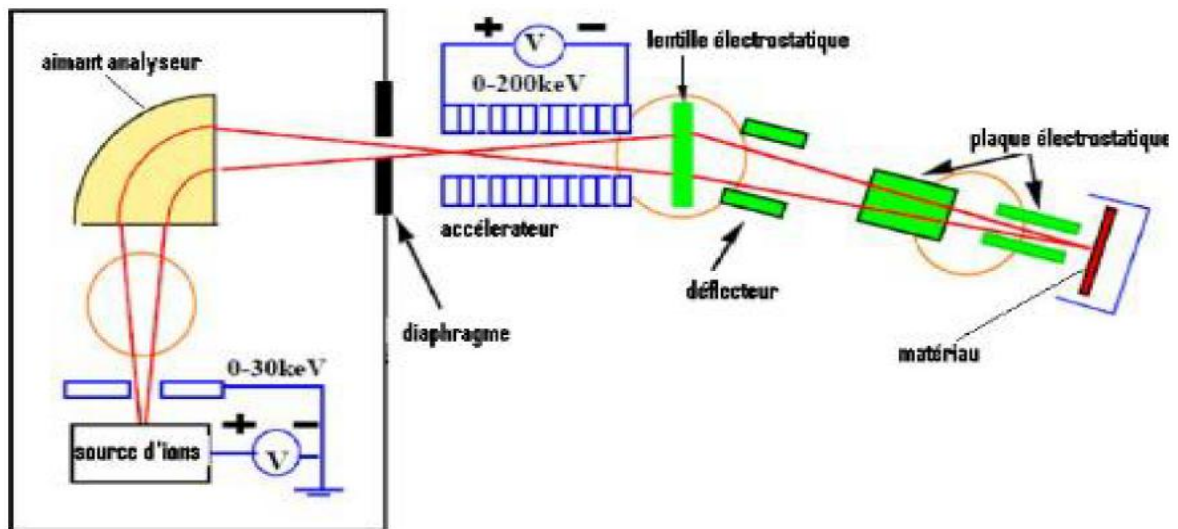


Figure 3 – 12 : Schéma de Principe d'un implantateur

3.3.5 Distribution des ions après implantation

En dépit de la précision avec laquelle la dose peut être contrôlée, l'implantation ionique est un processus aléatoire, car chaque ion suit une trajectoire aléatoire. Les ions incidents vont perdre leur énergie par chocs successifs avec les atomes de la cible. Ceci explique d'une part, la dispersion des trajectoires et d'autre part, que l'on définisse statistiquement une profondeur moyenne de pénétration. La statistique qui convient assez bien est gaussienne. Nous définissons ainsi deux paramètres:

a) Le parcours moyen projeté R_p

C'est la profondeur où les ions implantés s'arrêtent avec un maximum de concentration avec un écart type ΔR_p (la déviation standard) qui caractérise la répartition statistique des ions en profondeur autour de R_p (figure 3-13

b) La déviation latérale (l'écart moyen latéral) ΔR_{\perp}

C'est le parcours projeté sur le plan perpendiculaire à la direction d'incidence (perpendiculaire à la direction d'implantation), il caractérise la dispersion latérale des ions. C'est un paramètre très important surtout dans le cas de l'utilisation des masques pour la conception (architecture) des composants (figure 3-13).

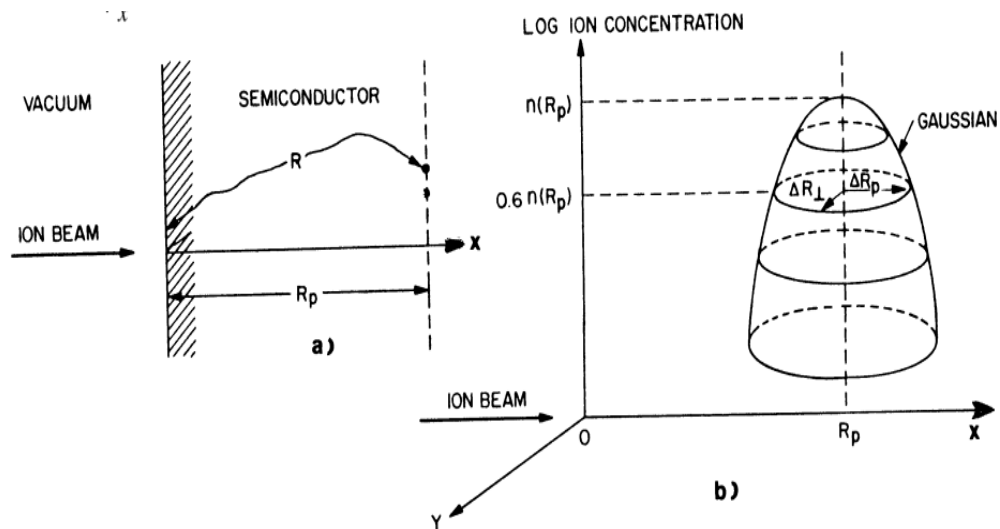


Figure 3 – 13 : Distribution des ions implantés dans une cible avec masque

On note que :

- (a) le chemin parcouru (R) est plus important que le parcours moyen projeté (R_p)
- (b) la distribution à deux dimensions des ions stoppés est gaussienne (ΔR_⊥)

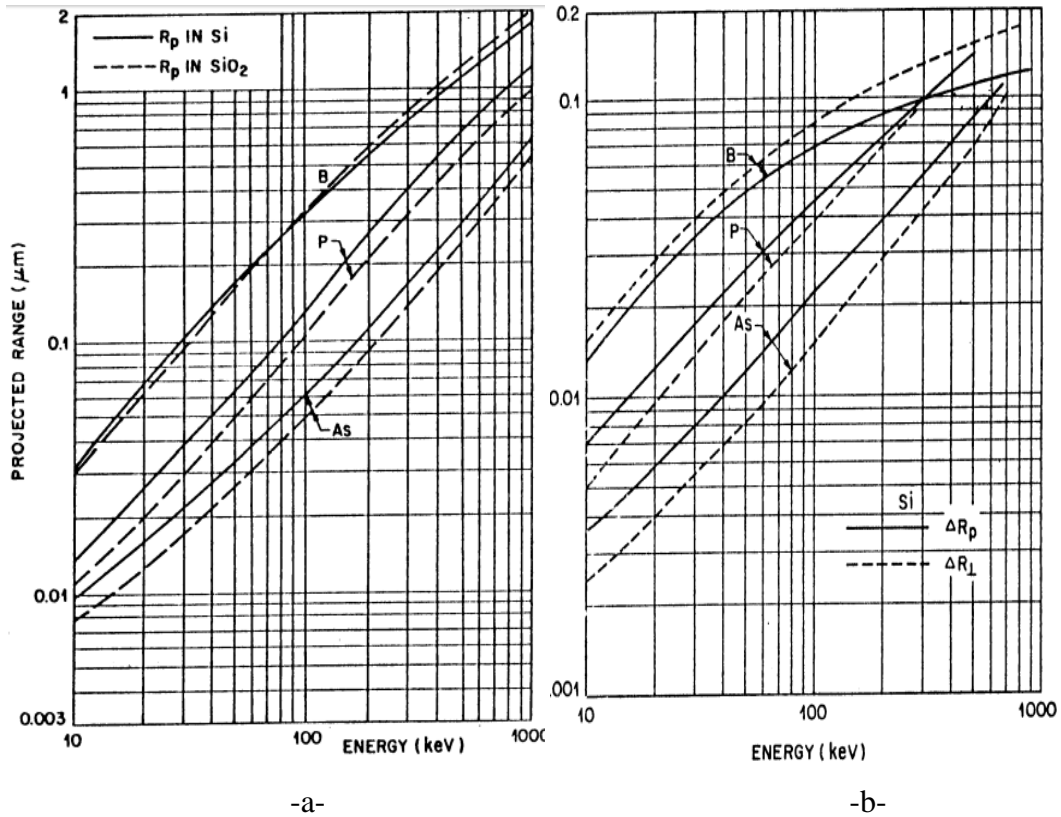


Figure 3 – 14 : implantation ionique d'impuretés dans le silicium :

-a- profondeur moyenne de pénétration R_p en fonction de l'énergie incidente des ions pour B, P et As dans Si et SiO_2 .

-b- écarts types axial et transverse de R_p en fonction de l'énergie incidente des ions pour B, P et As dans Si.

Les valeurs de R_p et ΔR_p et ΔR_L dépendent de toutes des caractéristiques du couple (ion incident/atome cible). La distance parcourue par un ion le long de sa trajectoire est déterminée à partir de l'énergie perdue, par collisions nucléaire et électronique, comme suit:

$$R = \int_0^R dr = \frac{1}{C} \int_0^R \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)} \quad (3-10)$$

C: est la concentration des ions implantés,

R : La distance réelle parcourue par un ion le long de sa trajectoire.

$s_n(E)$ et $s_e(E)$: Sont respectivement les pouvoirs d'arrêt nucléaire et électronique.

La fonction de distribution $n(x)$ est souvent de type gaussien. Dans le cas de distribution de Gaussienne, $n(x)$ est exprimée par la relation suivante:

$$N(x) = N_{\max} \exp\left(-\frac{(x-R_p)^2}{2(\Delta R_p)^2}\right) \quad (3-11)$$

➤ le maximum du profil de concentration à $x = R_p$ est donné par :

$$N_{\max} = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \approx \frac{0.4\Phi}{\Delta R_p} \quad (3-12)$$

Où :

R_p : est la profondeur du maximum de concentration.

ΔR_p : L'écart type.

Φ : La dose totale implantée (ions/cm²),

$N(x)$: La distribution en profondeur de tous les ions implantés (profil d'implantation).

L'influence de la dose d'implantation sur le profil de concentration des ions implantés est représentée sur la Figure II-14a dans le cas d'une implantation d'ions phosphore dans du silicium. On remarque que l'augmentation de la dose d'implantation ne modifie pas la profondeur moyenne des ions implantés R_p , mais augmente la concentration du pic maximal de la concentration des dopants. D'autre part, pour la même dose d'ions, l'augmentation de l'énergie d'implantation permet l'étalement de la concentration en profondeur tout en abaissant son point maximal.

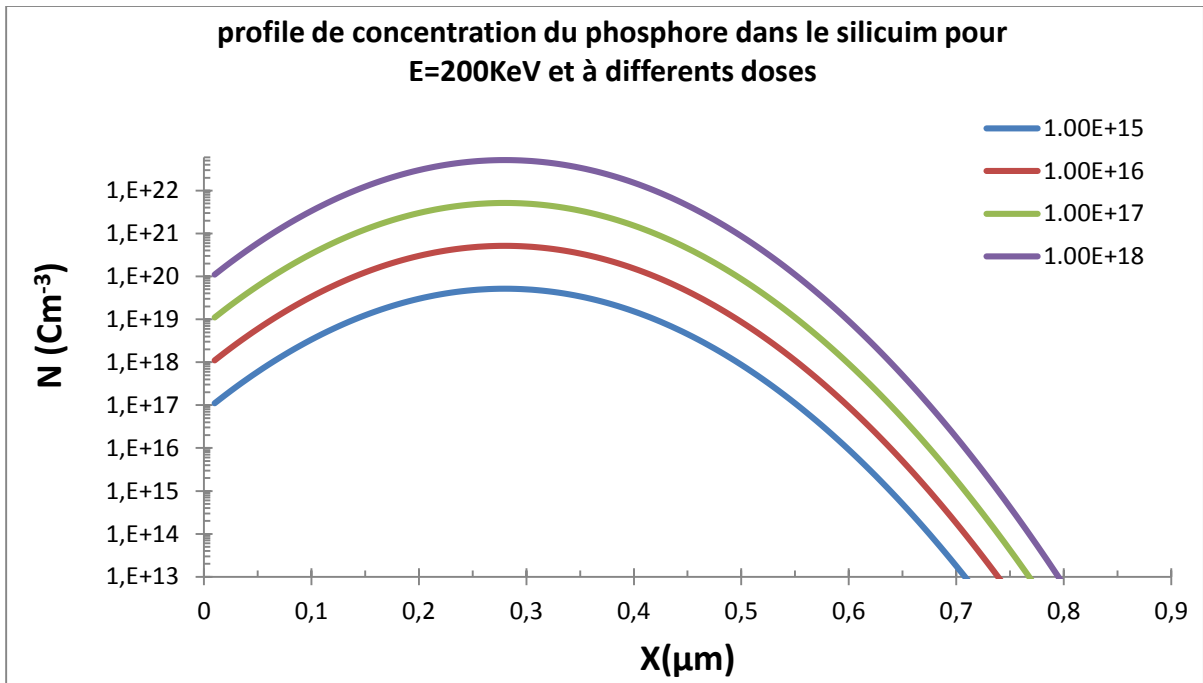


Figure 3 – 15 : Distribution d'ions implantés à 200 KeV dans le silicium

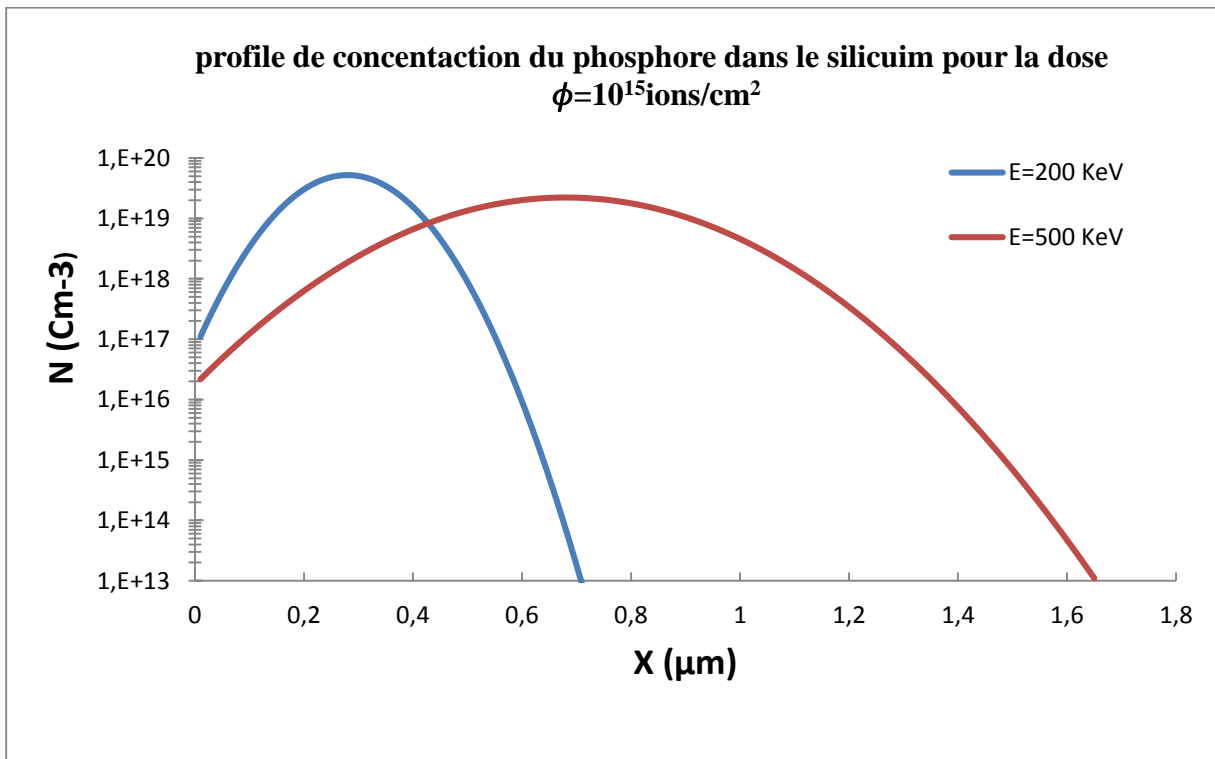


Figure 3 – 16 : Distribution d'ions implantés à dose 1×10^{15} dans le silicium

- Pour $x = x_j$ la concentration $n(x_j) = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ donc la profondeur de la jonction est donné par la relation (3-15):

$$N(x_j) = N_{\max} \exp\left(-\frac{(x_j - R_p)^2}{2(\Delta R_p)^2}\right) \quad (3-13)$$

$$\ln\left(\frac{N_{\max}}{N(x_j)}\right) = \frac{(x_j - R_p)^2}{2(\Delta R_p)^2} \quad (3-14)$$

$$x_j = R_p + \sqrt{2(\Delta R_p)^2 \ln\left(\frac{N_{\max}}{N(x_j)}\right)} \quad (3-15)$$

3.3.6 Les inconvénients et les avantages de l'implantation

a) Les inconvénients

Le bombardement d'un monocristal par des atomes crée des dommages dans la structure cristalline implantée. Celui-ci déplace les atomes du réseau en dehors de leurs positions d'équilibre, créant un grand nombre de défauts. Lorsque les doses sont élevées ($> 10^{16}$), le nombre d'atome hors site par unité de volume devient comparable à la densité atomique du semi conducteur qui devient alors amorphe. Un recuit thermique est indispensable après implantation. Celui-ci doit être réalisé à une température suffisamment basse ($< 600^\circ\text{C}$ pour le silicium par exemple) pour éviter la diffusion de l'impureté à l'intérieur du cristal.

Une partie de plus en plus courante consiste à effectuer des recuits thermiques à plus haute température (1000°C) mais durant des temps très brefs (ms) à l'aide de faisceaux d'électron, de faisceaux laser ou de lampes flash.

b) Les avantages

- Le profil de concentration en impuretés peut être très précisément contrôlé et de d'une manière reproductible,
- L'implantation se réalise à basse température,
- Il possible d'implanter des impuretés avec des concentrations supérieures à la limite de solubilité,
- Le dopant peut être implanté très près de la surface (0,05 μm -0.5 μm) avec une très faible diffusion latérale (grande capacité d'intégration),
- Un profil relativement plat de concentration en dopants en profondeur peut être obtenu à l'aide de plusieurs implantations successives.

Chapitre 4

Résultats de simulation et discussions

4.1 LOGICIEL DE SIMULATION : PC1D

PC-1D est un logiciel de simulation électrique commercialisé qui résout les équations décrivant le transport des électrons et des trous dans une dimension dans les dispositifs à matériaux semi-conducteurs cristallins. Ce logiciel est plus particulièrement conçu pour la simulation des dispositifs photovoltaïques.

4.2 Aperçu du logiciel

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaire PC1D a une réputation internationale dans la recherche photovoltaïque, il a été développé à l'université «New South Wales de Sydney » en Australie et présenté pour la première fois en 1985 ; qui est l'une des pionnières dans ces domaines. Il est actuellement à sa 5^{ème} version qui est utilisé dans ce travail.

La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la Figure I.1, ce logiciel se divise en quatre parties, les trois premières sont pour la programmation ; où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation.

4.2.1 Les paramètres du dispositif (Device) :

- ♦ Aire du dispositif (Device)

La surface du dispositif est très importante car elle influe sur le photo-courant d'une manière appréciable.

- ◆ Surface texturée

Les surfaces texturées utilisées dans toutes les structures étudiées sont composées de micro-pyramides directes ou inversées, La texturisation est très importante, car elle permet de diminuer les pertes par réflexion du rayonnement incident.

4.2.2 Les paramètres des régions du dispositif

- ◆ L'épaisseur de l'émetteur est relativement mince par rapport à la base.
- ◆ Le matériau utilisé: les paramètres qui le décrivent, sont stockés dans des fichiers d'extension (*.mat), Le logiciel fournit quelques données de matériaux comme le Silicium (Si), le Germanium (Ge) ou l'Arséniure de Gallium (AsGa). Les paramètres stockés dans ce fichier sont :

- Les mobilités μ des porteurs qui est le modèle utilisé par Thurber et al 1981,
- La constante diélectrique (la permittivité relative du matériau) ϵ_r ,
- L'énergie de bande interdite du matériau E_g (eV),
- La concentration intrinsèque n_i (cm^{-3}) du matériau,
- L'indice de réfraction n fixe ou en fonction de la longueur d'onde du rayonnement

incident,

- Le coefficient d'absorption est le modèle utilisé par Rajkanan et al en 1979 [1].
- L'absorption des porteurs libres : l'équation décrivant l'absorption de ces porteurs

libres est :

$$a=(2,6.10^{-27}.n.\lambda^3)+(2,7.10^{-24}.p.\lambda^2)$$

Par ailleurs, on choisit le type (de type n ou p) et la concentration en cm^{-3} de dopage du substrat (background) et également la résistivité de la base (Ohm-cm).

Pour le dopage des faces avant et arrière, après avoir choisi le type de dopage, le logiciel nous donne la possibilité de choisir quatre profils de dopage avec tous leurs paramètres tels que le pic de la concentration (pic concentration), sa position (pic position) et le facteur de profondeur (depth factor), :

- le profil uniforme,
- le profil exponentiel,
- le profil gaussien (comme celui de l'implantation ionique) et

- le profil fonction erreur complémentaire erfc (pour la diffusion thermique).

Il faut remarque qu'on peut introduire des profils de concentration externes issus de l'expérimentation ou de la littérature.

D'autre part, PC1D nous permet d'avoir la résistance carrée de ces faces dopées ainsi que leurs profondeurs de jonction (épaisseurs)

On introduit dans le simulateur, les recombinaisons en volume (dans le substrat moyennement dopé) dont le modèle utilisé est basé sur la statistique de Read-Shockley-Hall décrivant les recombinaisons par pièges, situées dans la bande interdite. Ces recombinaisons sont prépondérantes dans le volume par rapport aux recombinaisons Auger et radiatives

Enfin, on intègre les recombinaisons en surface tant qu'en face avant qu'en face arrière. Dans ce cas, les recombinaisons Auger ne sont pas négligeables.

4.2.3 Les paramètres d'excitation

- ♦ Deux fichiers intégrés dans le logiciel :

- « LightIV.exc » : qui permet de simuler la caractéristique courant- tension et autres caractéristiques,

- Et « Scan-qe.exc » qui permet de déterminer la réponse spectrale (Rendement quantique externe et interne ainsi que la courbe de la réflexion optique en fonction de la longueur d'onde.

- Pour le mode d'excitation : il y a trois modes : équilibre, stationnaire et transitoire.

Pour une bonne simulation numérique, le mode transitoire est vivement recommandé.

- ♦ Dans la plupart des cas, on choisit la température ambiante, $T=25^{\circ}\text{C}$. Il y a deux sources de Thevenin identiques, l'une pour la base et l'autre pour le collecteur. Seulement la face avant est éclairée, par un flux lumineux d'une intensité de $0,1 \text{ W/cm}^2$ (constante solaire P_i correspondante à AM1.5). Pour avoir la réponse spectrale, le logiciel fait un balayage sur l'intervalle de longueurs d'onde compris entre [300, 1200] nm qui est celui du spectre solaire allant de l'UV à l'IR en passant par le Visible. Pour avoir la caractéristique I-V, PC1D utilise directement le fichier étalon d'Air Masse (AM1.5) « am 15g.spc ». La seconde source est désactivée, car la face arrière n'est pas éclairée dans notre cas. Cette source est utilisée par exemple dans le cas d'une bifaciale.

4.2.4 Les résultats

Les résultats que nous pouvons visualiser sur l'écran en utilisant le fichier d'excitation «Light IV » sont :

- ♦ La valeur du courant de court circuit (Ampères),
- ♦ La valeur de la tension en circuit ouvert (Volts),
- ♦ La valeur de la puissance maximale (Watts).

Il faut noter que le courant de court-circuit et la puissance maximale doivent être divisés par la surface de la cellule afin de pouvoir être comparée. Dans le domaine photovoltaïque, on utilise la densité du courant de circuit et la densité de puissance.

Il est aisé de déterminer les deux autres caractéristiques de la cellule à savoir le Facteur de Forme et du rendement énergétique par les relations impliquant les trois paramètres calculés :

$$FF=I_{CC} * V_{co} / P_M \text{ et } \eta = P_M / P_i$$

Il faut remarque qu'à partir de la courbe de la puissance P en en fonction de V et de I en fonction de V, on peut également extraire le courant Maximum I_M et la tension maximale V_M qui sont les points de fonctionnement s de la cellule à sa puissance maximale (PFM ou MPP ; Maximum Power Point en anglais).

Et ceux obtenus avec le fichier « Scan-qe.exc » sont :

- ♦ Le Rendement Quantique Externe (RQE ou EQE : External Quantique Efficiency en anglais),
- ♦ Le Rendement Quantique Interne (RQI ou IQE : Internal Quantique Efficiency en anglais),
- ♦ La courbe du coefficient de Réflexion R.

4.3 Présentation des paramètres utilisés dans la simulation d'une cellule solaire à émetteurs réalisés respectivement par diffusion thermique et par implantation ionique.

Cette partie consiste à la simulation d'une cellule solaire à émetteur n et de substrat à base de silicium monocristallin (p).

La surface de la cellule simulée est de 1cm^2 . Pour minimiser les pertes optiques dues à la surface de l'émetteur, sa surface est texturée avec une profondeur (depth) de $3\mu\text{m}$ et d'angle facial à $54,74^\circ$. Il n'est texturé ici que la face avant, l'autre face est considérée à l'ombre.

L'émetteur homogène est dopé par diffusion au phosphore n^+ (à profil erfc) pour les cellules solaires à émetteurs réalisés par diffusion thermique, alors que les cellules solaires à émetteurs réalisés par implantation ionique sont en général de profil gaussien.

Dans ce travail, on s'est basé sur une publication de Solar Energy Materials and Solar Cells de l'année 2016 (journal de facteur d'impact 7,784 en cette année 2018).

Nous nous sommes donc basés sur un travail édité dans ce journal de l'éditeur Elsevier pour tenter de retrouver les mêmes résultats en utilisant le même calculateur qu'est PC1D. Néanmoins, nous avons éprouvé des difficultés à disposer des profils expérimentaux du dopage de l'émetteur par diffusion thermique et par implantation ionique.

Nous avons pu résoudre ce problème en utilisant un programme de relevés des points expérimentaux des profils et qui sont représentés sur les deux figures suivantes.

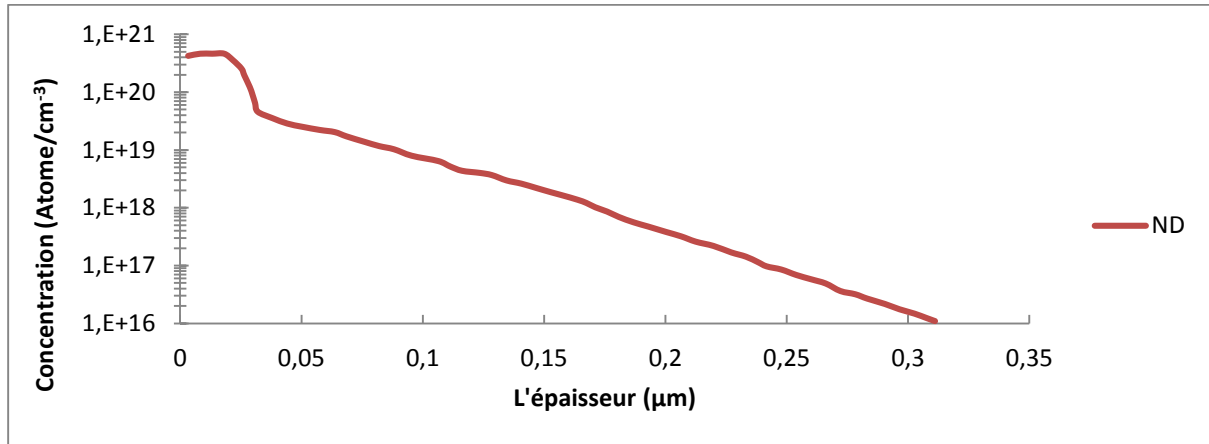


Figure 4 – 1: Variation du dopage en fonction de l'épaisseur de l'émetteur réalisé par diffusion thermique.

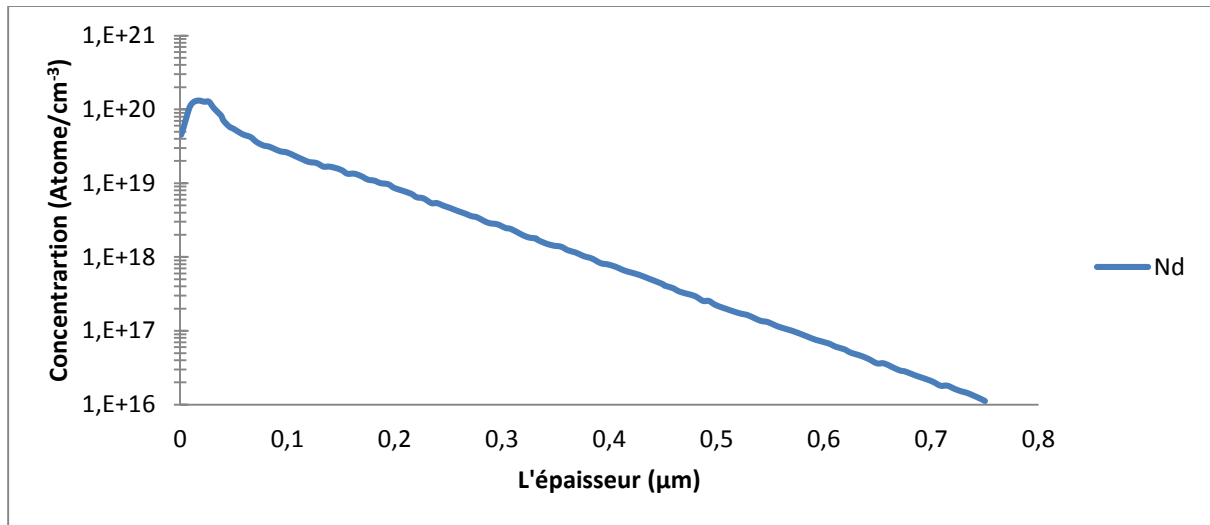


Figure 4 – 2: Variation du dopage en fonction de l'épaisseur de l'émetteur réalisé par implantation ionique.

Afin de montrer que les profils de la publication ont la même allure que ceux déterminés dans ce travail, nous les représentons ci-après tout en pouvant les comparer. Il est observé que les courbes des profils du papier en question ne vont pas au dessous de la concentration de 10^{16} cm^{-3} . Mais nous avons quelque peu prédit les queues des profils tout en approchant pas des calculs des résistances carrées utilisant la méthode des trapèzes pour calculer les intégrales :

$$R_{\text{carrée}} = \frac{1}{q \int_0^{x_j} \mu_n(x) N(x) dx}$$

Tableau 14 : La valeur de la résistance carrée des deux cellules (Cho & al_2016 et Nos calculs

	Profil de diffusion thermique	Profil d'implantation ionique
Valeurs de la publication	85 Ω /carré	85 Ω /carré
Nos calculs	74,55 Ω /carré	84,15 Ω /carré

La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la Figure(4-3) et la Figure(4-4) , ce logiciel se divise en quatre parties, les trois premières sont pour la programmation ; où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation.

DEVICE
 Device area: 1 cm²
 Front surface texture depth: 3 μm
No surface charge
 Front reflectance from c:\users\iyori\desktop\implan
 Exterior Rear Reflectance: 65%
 Internal optical reflectance enabled
 Front surface optically rough
 Emitter contact enabled
 Base contact: 0.6 Ω
 Internal conductor: 2.02×10⁻⁴ S

REGION 1
 Thickness: 190 μm
 Material modified from si.mat
 Carrier mobilities from internal model
 Dielectric constant: 11.9
 Band gap: 1.124 eV
 Intrinsic conc. at 300 K: 1×10¹⁰ cm⁻³
 Refractive index from c:\users\iyori\desktop\si.inr
 Absorption coeff. from c:\users\iyori\desktop\si.abs
 Free carrier absorption enabled
 P-type background doping: 9.787×10¹⁵ cm⁻³
 Front doping from c:\users\iyori\desktop\implantatio.dop
No rear diffusion
 Bulk recombination: τ_n = τ_p = 250 μs
 Front-surface recom.: S model, S_n = S_p = 10000 cm/s
 Rear-surface recom.: S model, S_n = S_p = 200 cm/s

EXCITATION

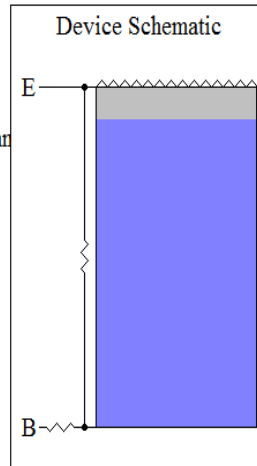


Figure 4 – 3: Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique pour cellule diffusé

DEVICE
 Device area: 1 cm²
 Front surface texture depth: 3 μm
No surface charge
 Front reflectance from c:\users\iyori\desktop\diffusi
 Exterior Rear Reflectance: 65%
 Internal optical reflectance enabled
 Front surface optically rough
 Emitter contact enabled
 Base contact: 0.71 Ω
 Internal conductor: 3.32×10⁻⁴ S

REGION 1
 Thickness: 190 μm
 Material modified from si.mat
 Carrier mobilities from internal model
 Dielectric constant: 11.9
 Band gap: 1.124 eV
 Intrinsic conc. at 300 K: 1×10¹⁰ cm⁻³
 Refractive index from c:\users\iyori\desktop\si.inr
 Absorption coeff. from si300.abs
 Free carrier absorption enabled
 P-type background doping: 9.787×10¹⁵ cm⁻³
 Front doping from c:\users\iyori\desktop\difussion.dop
No rear diffusion
 Bulk recombination: τ_n = τ_p = 500 μs
 Front-surface recom.: S model, S_n = S_p = 25000 cm/s
 Rear-surface recom.: S model, S_n = S_p = 200 cm/s

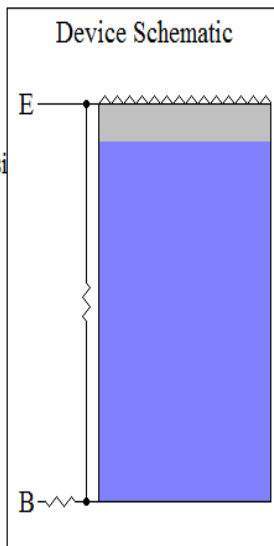


Figure 4 – 4: Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique

4.4 Etude et optimisation par simulation des cellules solaires

4.4.1 Paramètres de la simulation

Les paramètres que nous avons utilisés (Cho et al, 2016) pour le calcul par PC1D sont représentés dans le tableau (4-1).

Tableau -15: Les différents paramètres initiaux de simulation de la cellule étudiée (Cho et al, 2016)

Paramètres de la cellule	Diffusion thermique	Implantation ionique (dose $3.10^{15} \text{ cm}^{-2}$)
La surface de la cellule (en cm^2)	239	239
L'épaisseur du matériau (en μm)	190	190
La résistivité de la base ($\Omega \cdot \text{cm}$)	1.5 (équivalent à un dopage au Bore de $9 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)	1,5 (équivalent à un dopage de $9 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$)
La résistance série ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	0,71	0,60
La résistance parallèle (shunt) ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	3007	4950
Résistance carrée (sheet de l'émetteur) (Ω/\square)	85	85
La durée de vie des électrons et des trous (respectivement τ_n et τ_p) dans le volume (base) (en μs)	500	250
La vitesse de recombinaison des électrons s_n à l'arrière de la cellule (cm/s)	200	200
La vitesse de recombinaison des porteurs à la surface de l'émetteur (cm/s)	25 000	10 000
Réflectance optique externe sur la face arrière	65 %	65 %
Courant de recombinaison J_{02} dans la zone de charge d'espace (fA/cm^2)	20	20

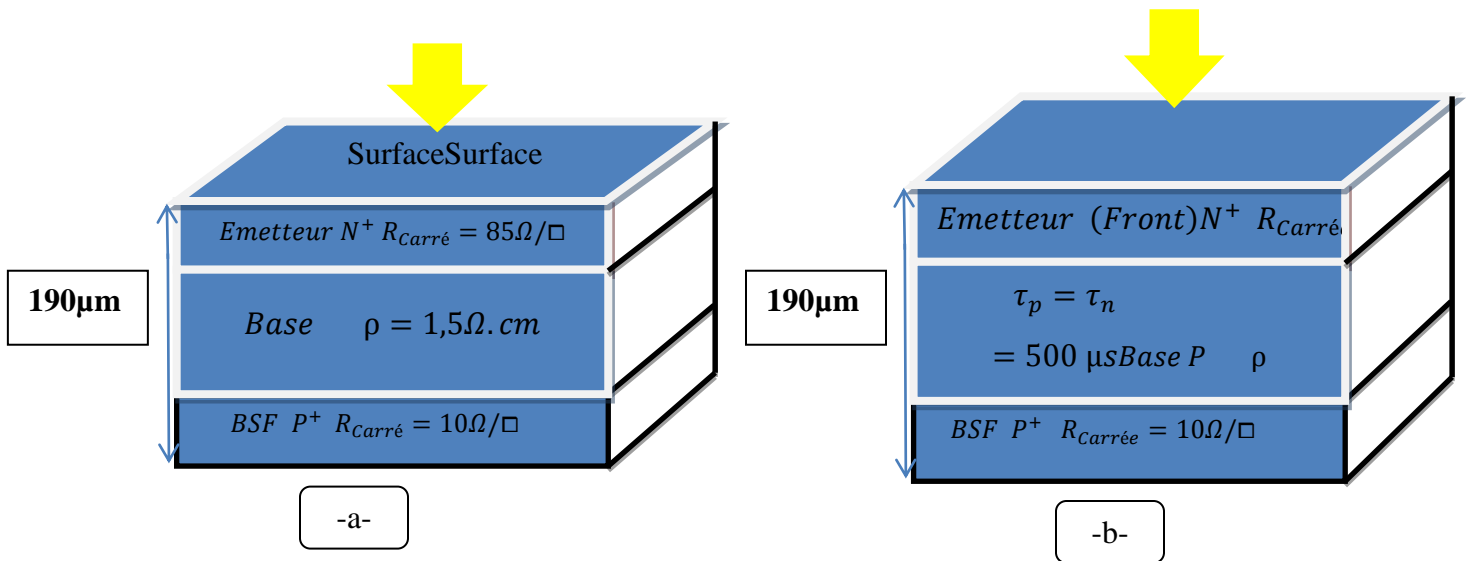


Figure 4-5 : Schéma de la structure avec les paramètres initiaux de la cellule solaire étudiée

-a- Diffusion thermique

-b- Implantation ionique.

Tableau 16: Résultats des deux cellules (Cho & al_2016 et simulée)

paramètres	Diffusion thermique		Implantation ionique	
	Cellule de la littérature	Cellule étudiée dans ce travail	Cellules de la littérature	Cellule étudiée dans ce travail
I_{cc} (mA/cm ²)	37,8	37,9	37,9	37,8
V_{co} (V)	0,637	0,635	0,643	0,645
η (%)	19,1	19,1	19,4	19,6
FF(%)	79,2	79	79,6	80

4.4.2 Résultat et comparaison

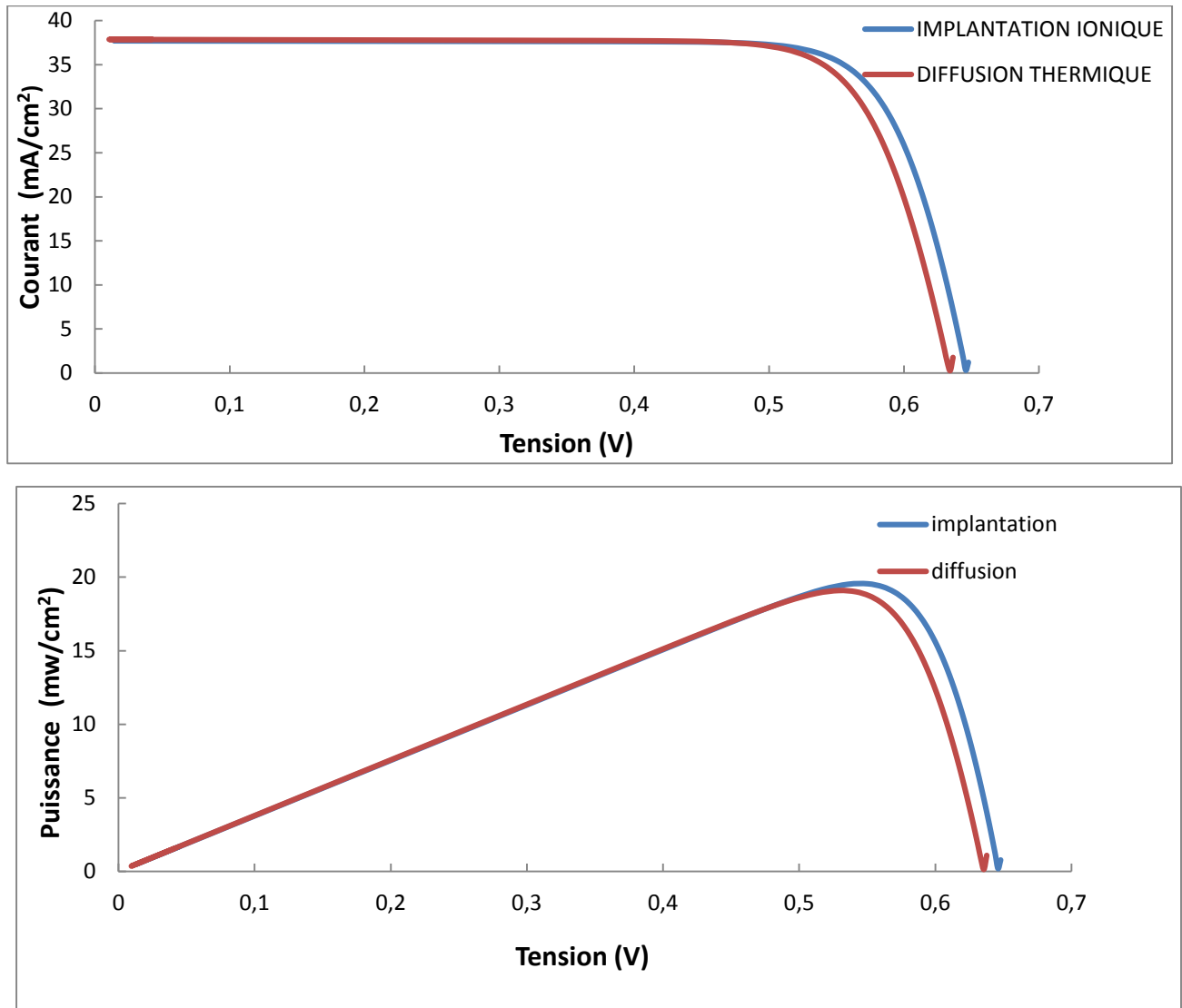


Figure 4-6: Caractéristiques de la cellule solaire simulée

La caractéristique courant-tension des deux cellules solaires conventionnelle simulée est comme le montre la courbe de la Figure(4-5) tandis que la figure(4-6)représente sa courbe de puissance , nous avons distingué une stabilité dans les caractéristiques photovoltaïques de la cellule solaire à émetteurs réalisés respectivement par diffusion thermique et par implantation ionique afin la valeur maximale de la tension de circuit ouvert égale 0.53mV mais après cette valeur , Nous avons remarqué une générale amélioration dans les caractéristiques

photovoltaïques de la à émetteurs réalisés par implantation ionique par rapport la cellule solaire à émetteurs réalisés par diffusion thermique .

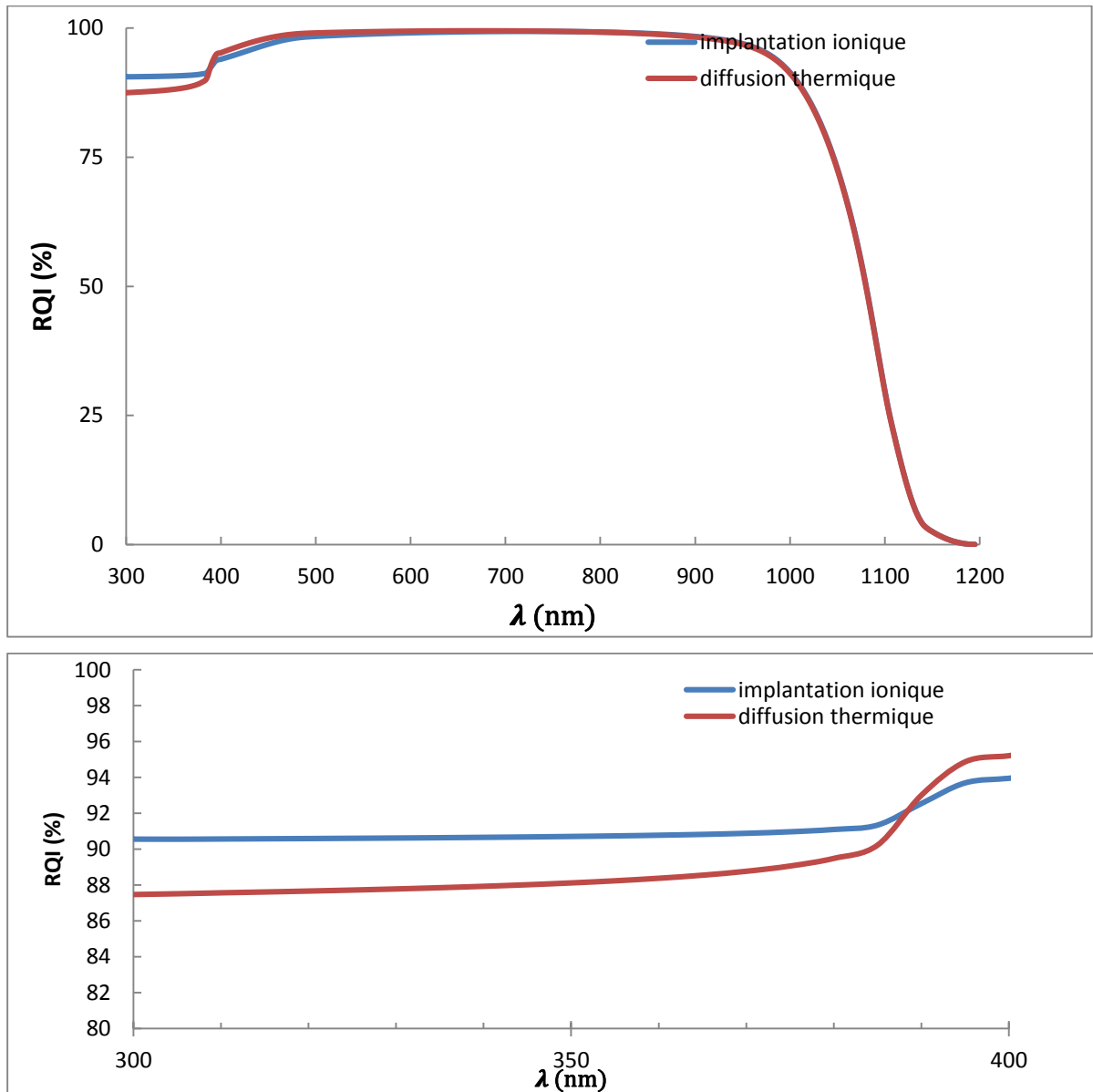


Figure 4-7: Comparaison des rendements quantiques interne des deux cellules.

On constate que le REI s'améliore comme les longueurs d'onde U.V pour l'émetteur à réalisation ionique par rapport à cellule de la diffusion thermique. Ceci peut s'expliquer pour le silicium, par son grand le coefficient d'absorption pour les petites longueurs d'onde au

l'épaisseur d'absorption qui inversement proportionnelle à ce coefficient ($\frac{1}{\alpha}$) est de l'onde quelques microns qui correspond à l'épaisseur de la face frontale de la cellule, zone à se trouve l'émetteur.

4.4.3 Etude et validation des résultats des deux cellules

Du moment que nous avons trouvé approximativement le même résultat (entre les cellules étudiées et celle simulées).

Maintenant nous avons varié quelques paramètres parmi les plus importants de Cette cellule afin optimiser ses caractéristiques que sont le courant - circuit I_{CC} , la tension de circuit ouvert V_{CO} , le facteur de forme FF, le rendement énergétique η

Donc, à partir de la cellule solaire de référence, nous avons varié la durée de vie de la base des cellules, puis on a comparé le rendement énergétique entre les deux types des cellules solaires en question.

4.4.3.1 Effet de la durée de vie sur les paramètres de la cellule solaire

1 Etude du courant de court-circuit I_{cc} :

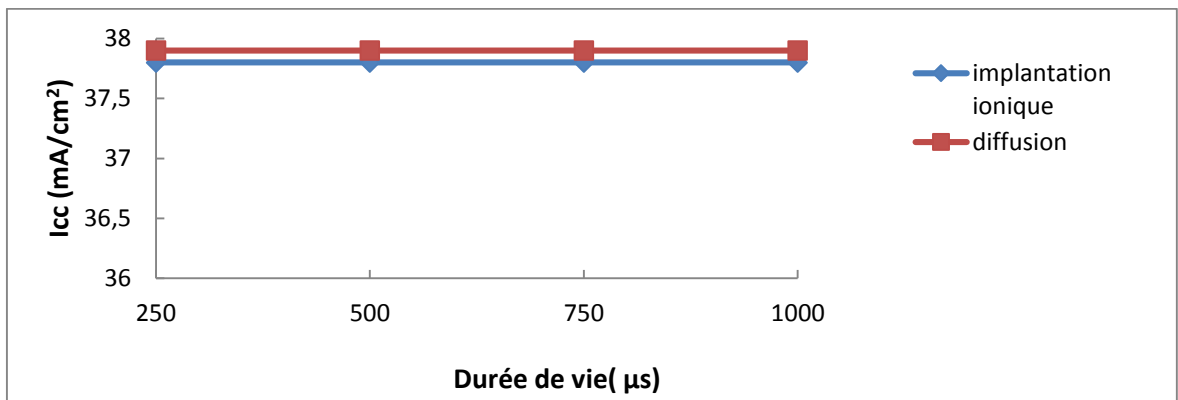


Figure 4-8: Variation du courant de court-circuit en fonction de la durée de vie.

D'après les résultats de la simulation, nous avons remarqué que lorsque la durée de vie varie (de 250µs à1000µs), il y a une stabilité du courant de court-circuit des deux cellules. Mais du courant de court-circuit de la cellule réalisé par diffusion thermique mieux de courant de court-circuit de la cellule réalisé par implantation ionique avec de différence absolue d'environ 0.1mA/cm².

2 Etude de la tension de circuit ouvert V_{co} :

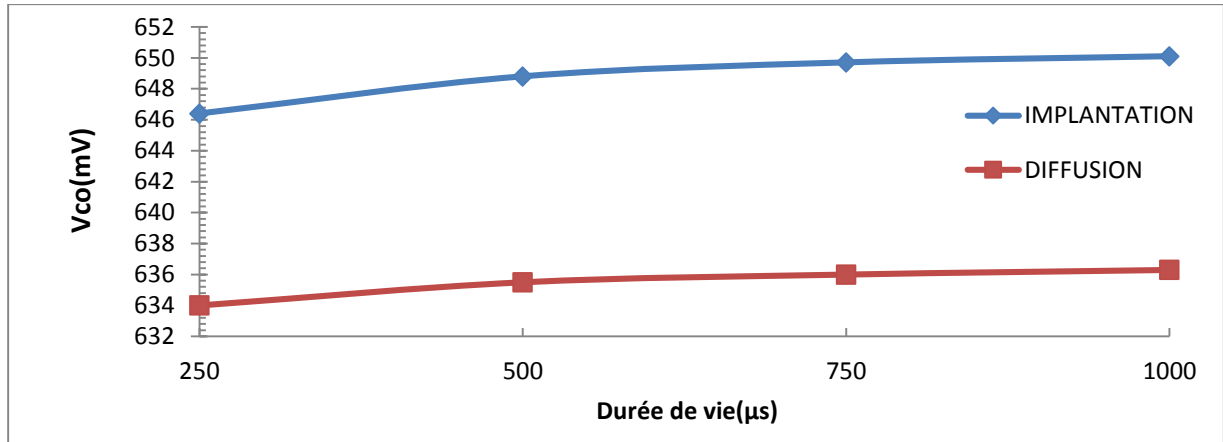


Figure 4-9: Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de la durée de vie de base.

On remarque une légère augmentation de la tension circuit – ouvert avec l’augmentation de la durée de vie (250-1000 μs), jusqu’à la valeur de 0,636 V dans la cellule à émetteur réalisé par diffusion thermique, et à 0,650 V dans la cellule à émetteur réalisée par implantation ionique. Ensuite, nous observons une saturation pour la durée de vie ce qui apprécié 1000 μs . s’améliore d’à peu près 15 mV pour chaque valeur de la durée de vie, passant, par exemple autour de 650 mV pour l’émetteur implanté et 635 mV pour l’émetteur diffusé à la durée de vie de 750 μs .

3 Etude du facteur de forme FF :

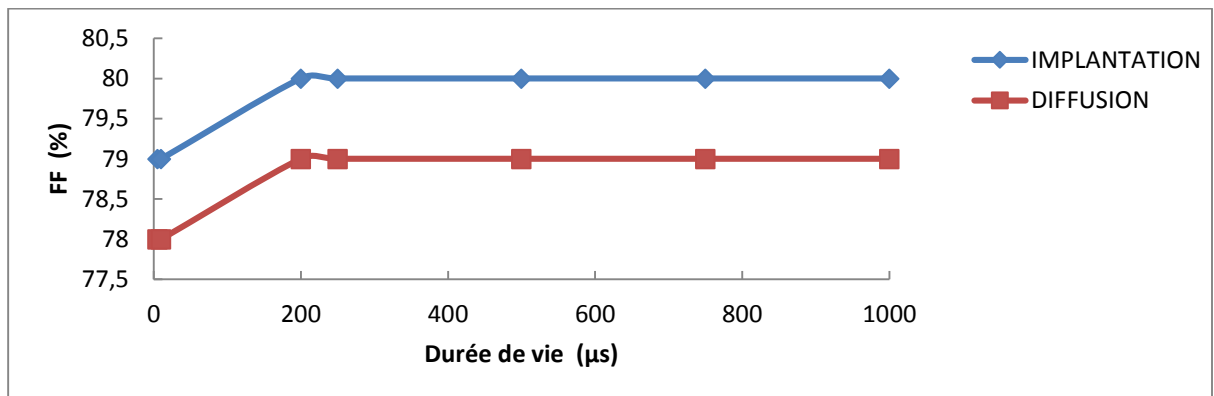


Figure 4-10: Variation du facteur forme en fonction de la durée de vie de base.

Lorsque on fait varier la durée de vie de la base, on constate que le facteur de forme croit jusqu'à une valeur optimale 80,1 % pour la cellule implanté et 79 % pour la cellule diffusé ces valeurs devient pour même de la durée de vie de la base (200 μ s), et stabilise pour cette la durée de vie.

4. Etude du rendement η :

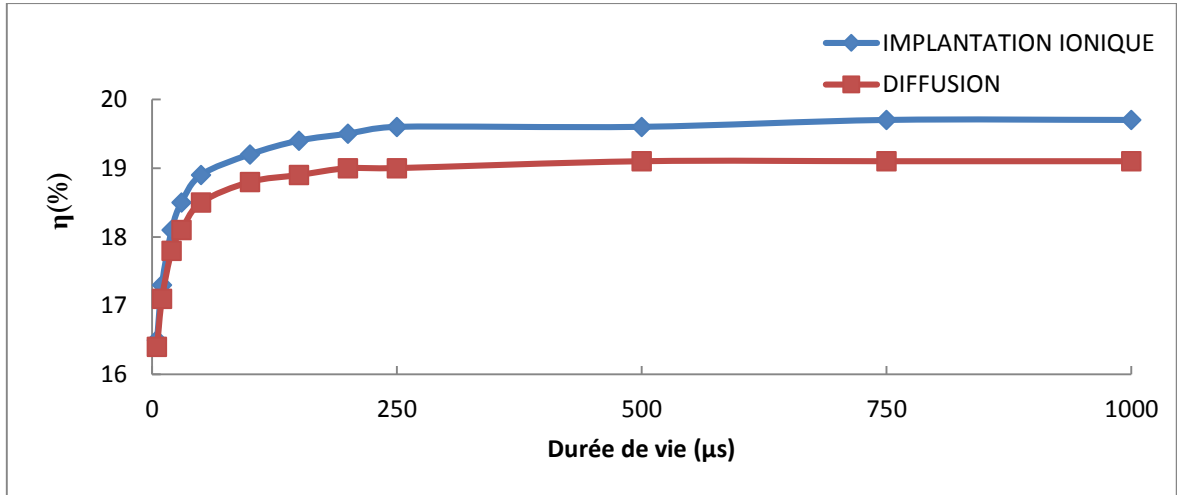


Figure 4-11: Variation le rendement en fonction de la durée de vie de la base.

Pour le rendement de la cellule implanté, on remarque à peu près la même forme de variation que celle de le rendement de la cellule diffusé, un accroissement jusqu'à une valeur optimale 19.6% et 19.1% d'une cellule solaire à émetteurs réalisés respectivement implantation ionique et par diffusion thermique et est suivi une stabilité à partir de la durée de vie de la base de 500 μ s.

Remarque : les résultats obtenus ci-dessus par nos calculs sont exactement celles déterminées par la littérature comme le montre la figure (4-12) suivante :

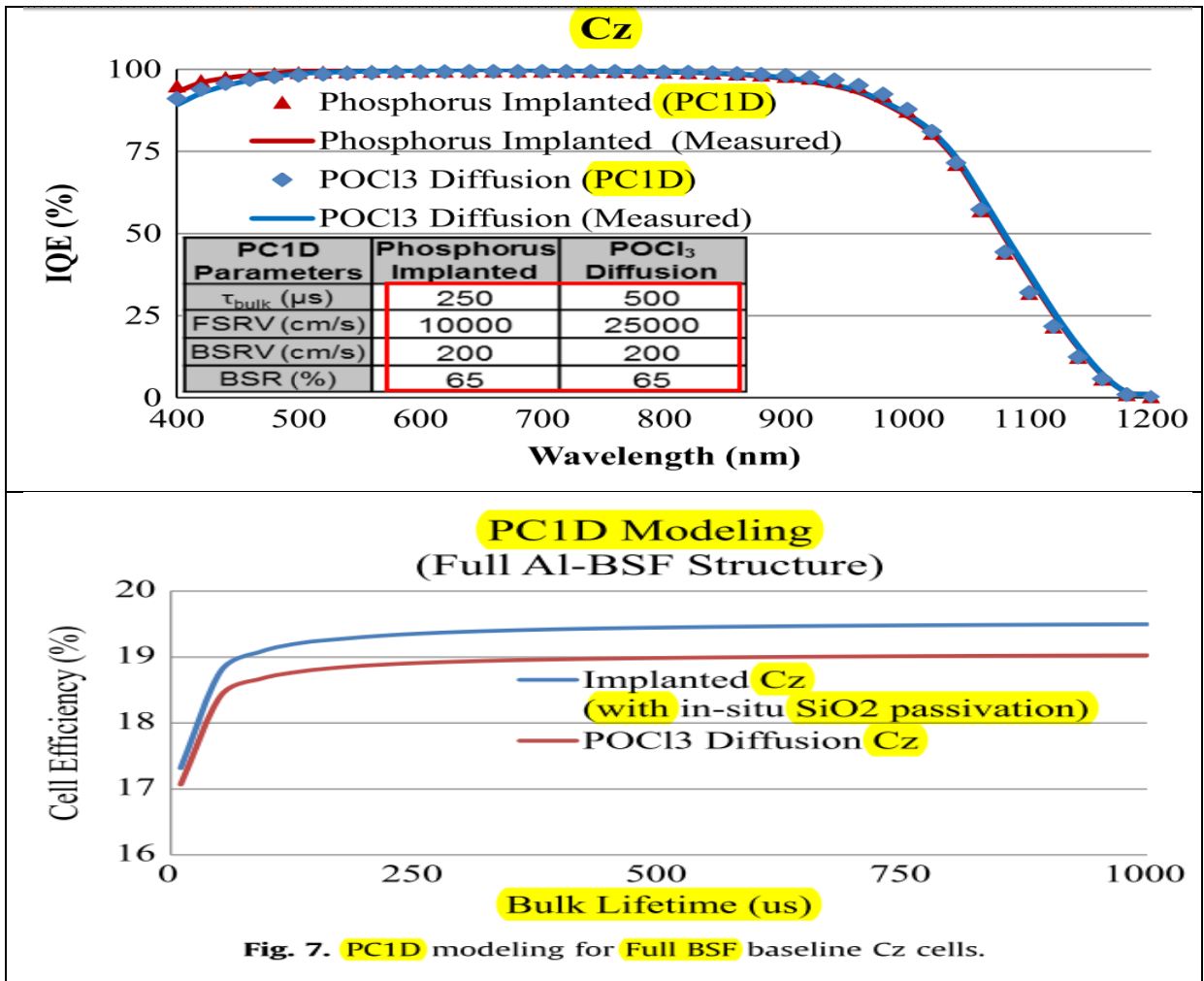


Figure 4-12: Courbes obtenues par Cho et al.

Ces courbes démontrent bien la validation de nos résultats.

Tableau 4-3 : Rendement de la cellule à différents durée de vie de la base

Durée de vie (μs)	5	250	500	750	1000
Implantation ionique	16.5	19,6	19,6	19,7	19,7
Diffusion thermique	16.4	19	19,1	19,1	19,1

Après avoir étudié la comparaison entre les deux types de technologie de fabrication de l'émetteur, il est clair que la technologie de l'implantation ionique améliore les paramètres de la cellule solaire comme nous venons de le voir.

Maintenant, nous allons varier d'autres paramètres de l'émetteur implanté dans l'objectif de l'optimiser.

4.4.3.2 Effet de la résistivité de la base sur les paramètres de la cellule solaire à émetteur implanté.

1 Etude du courant de court-circuit I_{cc} :

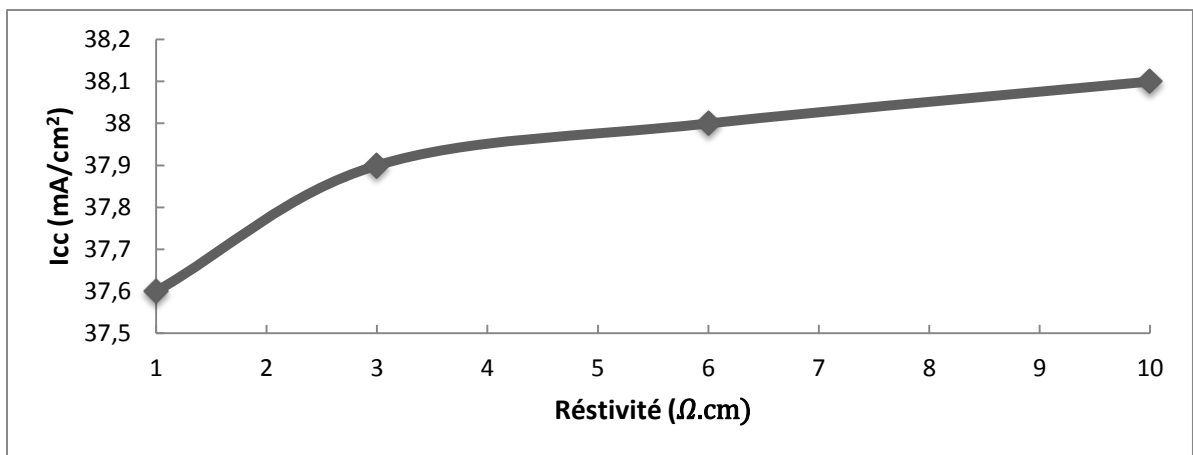


Figure 4-13: Variation du courant de court-circuit en fonction de la résistivité de la base

Lorsque la résistivité de la base varie de 1 à 10 $\Omega.cm$ (Figure 4-13), on constate que le courant de court-circuit augmente jusqu'à la valeur de 38,1 mA/cm^2 correspondant à une résistivité de base de 10 $\Omega.cm$.

2 Etude de la tension de circuit ouvert V_{co} :

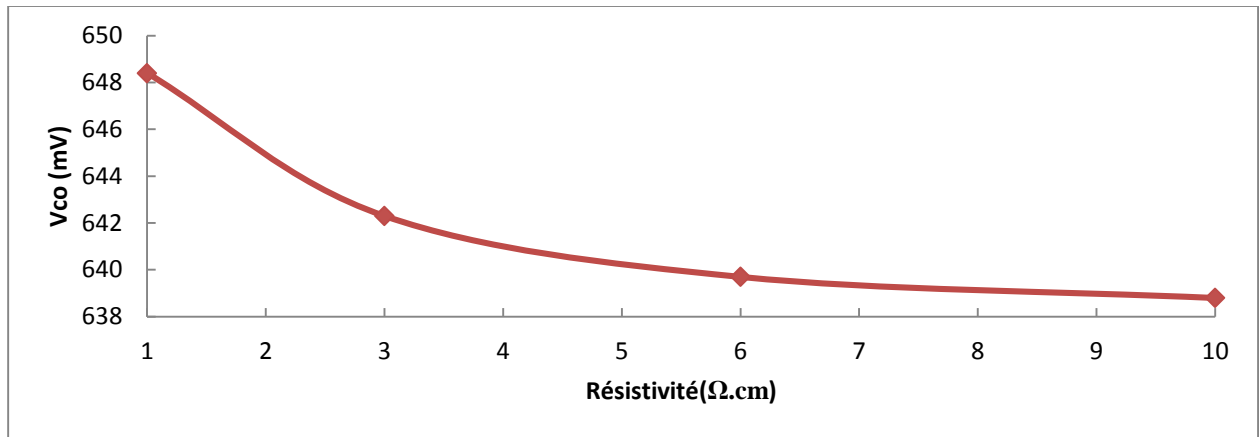


Figure 4-14: Variation de la tension de circuit ouvert en fonction de la résistivité de la base

D'après les résultats, nous constatons que lorsque la résistivité du substrat augmente, la tension de circuit ouvert diminue légèrement avec la résistivité de la base (variation de 8.7 mV dans l'intervalle 1-6 Ω.cm).

3 Etude du facteur de forme

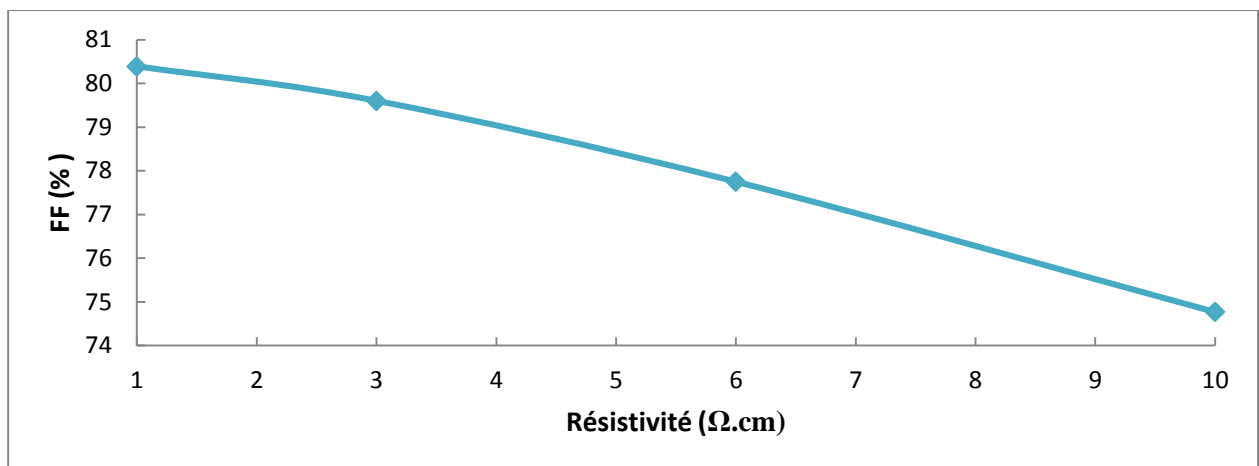


Figure 4-15 : Variation du facteur de forme en fonction de la résistivité de la base

Comme on peut le voir sur la figure (4-15), l'augmentation de la résistivité de substrat 1Ω.cm à 10Ω.cm il ya une dégradation du facteur de forme (variation 5,62%).

4 Etude du Rendement

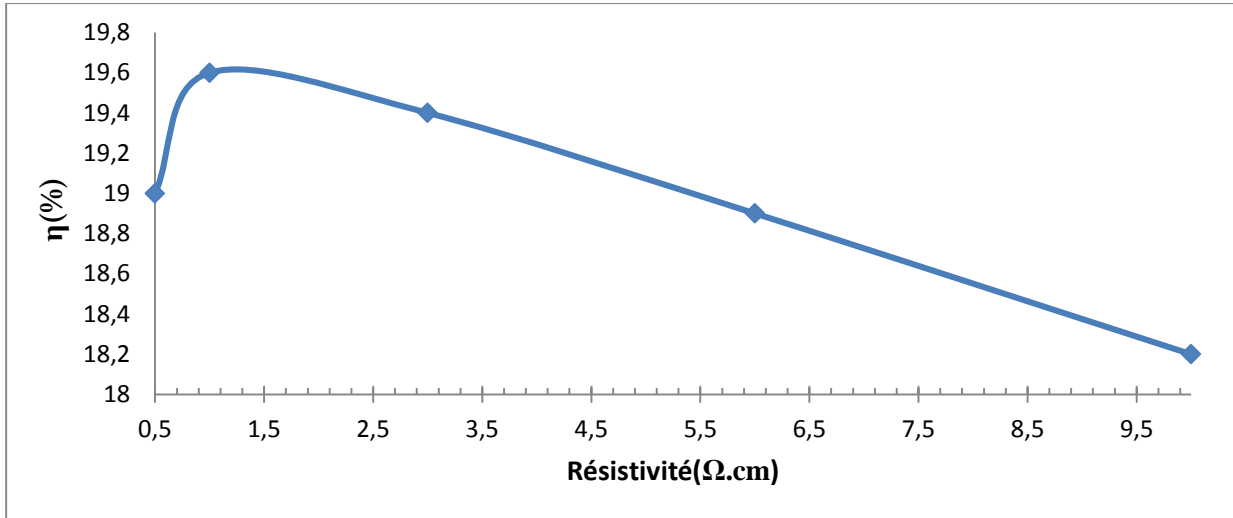


Figure 4-16 : Variation du rendement en fonction de la résistivité de la base

Si on varie la résistivité de la base, on remarque que le rendement (η) augmente de 19% jusqu'à une valeur optimale 19.6% pour la résistivité de la base 1 $\Omega \cdot \text{cm}$ puis commence à décroître strictement.

4.4.3.3 Effet de l'épaisseur de base sur les paramètres de la cellule solaire

1 Etude du courant de court-circuit I_{cc}

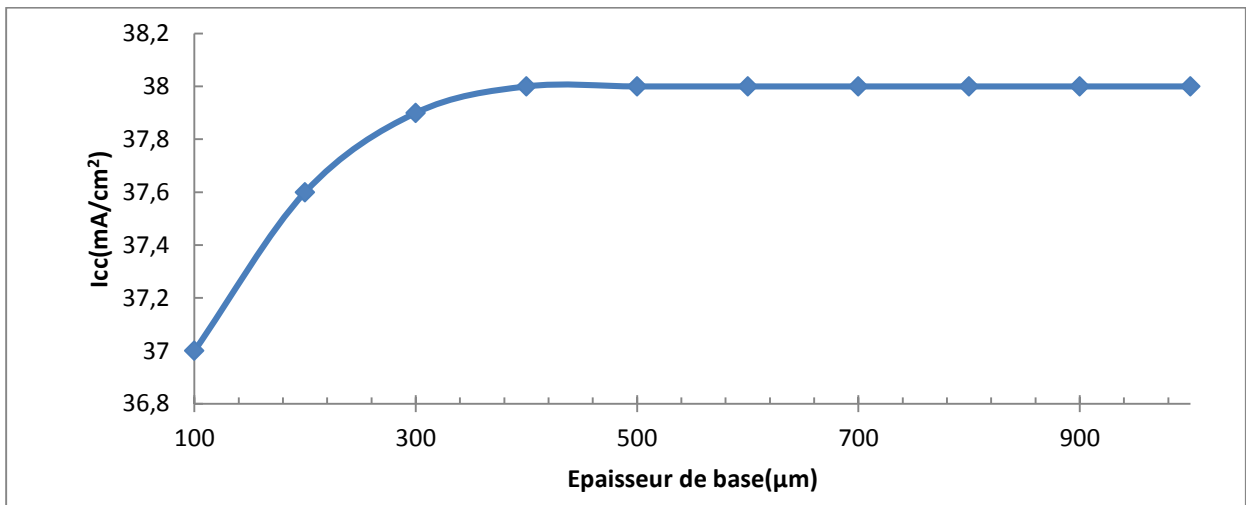


Figure 4-17: variation de rendement en fonction de l'épaisseur de la base

Nous notons, que la densité de courant (I_{cc}) augmente de 37 mA/cm^2 à 38 mA/cm^2 pour les épaisseurs allant de 100 jusqu'à $420 \mu\text{m}$. Au delà de ces valeurs, le courant se sature et reste égal à 38 mA/cm^2 .

2 Etude de la tension de circuit ouvert V_{co} :

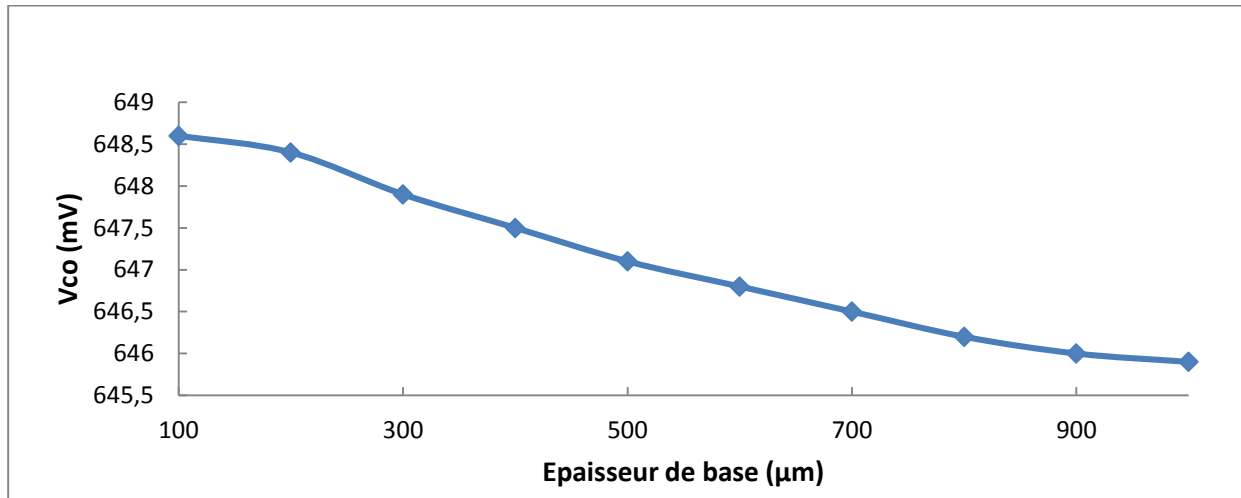


Figure 4-18: Variation de tension circuit- ouvert en fonction de l'épaisseur de la base

On remarque que plus l'épaisseur de la base (couche de type p) augmente plus la tension en circuit ouvert diminue, donc il arrive jusqu'à 645.9 mV dans cette cellule.

3 Etude du facteur de forme

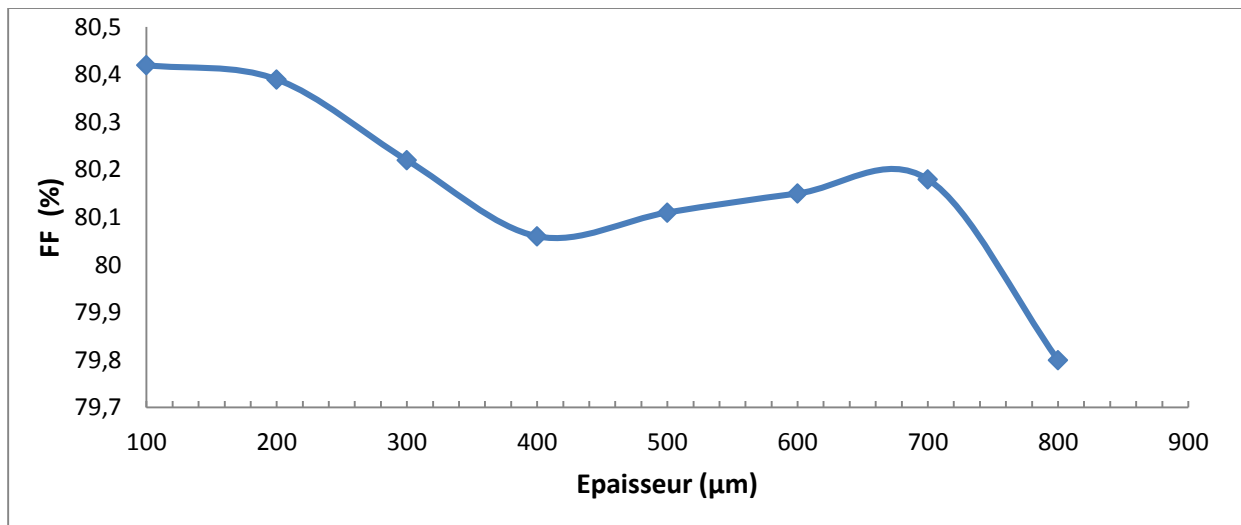


Figure 4-19: Variation le facteur de forme en fonction de l'épaisseur de la base

On constate que le facteur de forme diminue de 80.42 % pour l'épaisseur de 100 μm à 80.06 % pour 400 μm et augmentation jusqu'à une valeur optimale 80,18 % pour l'épaisseur d'environ 700 μm , puis commence à décroît strictement.

4 Etude du Rendement

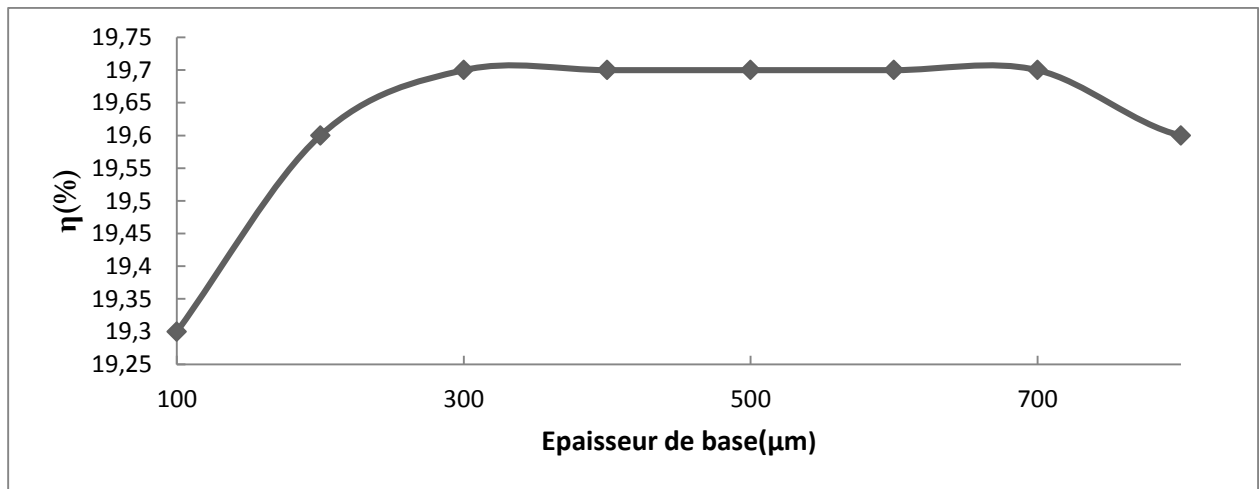


Figure 4-20: Variation le rendement en fonction de l'épaisseur de la base

Selon ces résultats, nous remarquons vers petite l'épaisseur du substrat de 100 μm à 300 μm , le rendement accroissement. Par contre, pour grand l'épaisseur du substrat, on remarque aussi, que le rendement obtenu pour une épaisseur de (300 μm à 700 μm) est 19,7 %. puis à décroît légèrement. Donc, les couches à très faible épaisseur donnent un meilleur rendement.

Conclusion

Pour la base, on a constaté que tous les paramètres de la cellule (J_{cc} , V_{co} , FF et η) augmentent rapidement jusqu'à la valeur de 1000 μs de la durée de vie correspondante aux valeurs (37.8 mA/cm^2 , 650.1 mV, 80. %, 19.7 %) respectivement. De même, le rendement de conversion augmentent avec l'épaisseur de la base jusqu'à 400 μm correspondante à 19.7 %, puis ils diminuent en raison de l'augmentation de la résistivité. La valeur de la résistivité optimisée est de 1 $\Omega \cdot \text{cm}$ pour un rendement maximum de 19.7 %.

Conclusion Générale

L'énergie solaire est la source d'énergie la plus prometteuse et la plus puissante parmi les énergies renouvelables. L'électricité photovoltaïque (PV) est obtenue par transformation directe de la lumière du soleil en électricité, au moyen de cellules PV.

Nous avons présenté dans le premier chapitre quelques notions de base sur l'ensoleillement et la composante du spectre solaire et notamment la notion de la masse d'air et le spectre de référence AM1.5.

Nous avons présenté dans le deuxième chapitre les notions fondamentales des semi-conducteurs qui nous ont permis de décrire la jonction P-N à l'équilibre thermodynamique et qui est la pierre angulaire de la cellule solaire. Les polarisations directe et indirecte de la jonction ont été également abordées pour la compréhension ultérieure de la caractéristique $I(V)$ de la cellule. Ensuite ce sont les différents types de recombinaison dans le semi-conducteur qui peuvent altérer le rendement qui ont été passés en revue. Par la suite, nous avons abordé le fonctionnement d'une cellule solaire et ses paramètres principaux. Enfin, nous avons terminé ce chapitre par la description, les différentes pertes limitant le rendement énergétique.

Dans le troisième chapitre, nous avons rappelé la diffusion thermique et sa théorie par les équations de Fick et les mécanismes de diffusion présents dans le réseau cristallin du silicium. Quant à l'implantation ionique, elle a été également exposée ainsi que la technologie de ces deux technologies.

Le quatrième et dernier chapitre, du présent travail, aborde la simulation numérique du comportement de la cellule d'une cellule solaire à émetteurs réalisés respectivement par diffusion thermique et par implantation ionique. Les résultats obtenus sont présentés, commentés et comparés aux valeurs expérimentales tirées de la littérature d'un article

américain paru en 2016 dans le journal spécialisé « Solar Energy Materials & Solar Cells » de l'éditeur Elsevier.

Ce travail de simulation a été réalisé à l'aide PC1D de Paul Basore ses collaborateurs. Le logiciel PC1D environnement Windows. Il a été développé pour simuler les caractéristiques électriques des cellules solaires et également pour d'autres composants.

Notre travail a consisté à l'utilisation de logiciel pour l'étude de deux cellules photovoltaïques de base de type P :

- La première à émetteur de type n^+ réalisé par diffusion thermique,
- et la seconde à émetteur du même type mais réalisé par implantation ionique.

Ceci dans l'objectif de faire une comparaison entre ces deux technologies par la détermination de leurs paramètres photovoltaïques.

La première partie a concerné la validation des résultats obtenus en comparaison avec ceux trouvés pour des deux cellules prises comme références. Les paramètres concernés sont le courant de court-circuit I_{cc} pour les deux cellules, leurs tensions de circuit ouvert V_{co} , leurs facteurs de forme FF et enfin leurs rendements énergétiques η qui ont été évalués en fonction de la durée de vie des porteurs dans la base de la cellule en la variant de 250 μs jusqu'à 1000 μs . Nous avons constaté selon les résultats trouvés sont en totale concordance avec ceux de l'article.

Selon ces calculs, nous avons retenu la valeur de 500 μs pour la durée de vie de la base qui donne à peu près les meilleures performances du rendement pour les deux cellules.

Après avoir étudié la comparaison entre les deux types de technologie de fabrication de l'émetteur, nous avons constaté clairement que la technologie de l'implantation ionique améliore les paramètres de la cellule solaire par rapport à la diffusion thermique comme nous venons de le voir.

La seconde partie de notre étude n'a porté que sur l'optimisation d'autres paramètres de la cellule à émetteur implanté à savoir :

- la résistivité de la base que nous avons varié de 0,5 à 10 $\Omega.cm$,
- et l'épaisseur de la base allant de 100 à 800 μm .

On a fait varier les paramètres essentiels de la cellule solaire pour observer leurs influences sur ses caractéristiques.

La modélisation s'est faite en variant un seul paramètre et en gardant fixes les autres.

Les paramètres optimisés qui nous ont permis d'obtenir un rendement optimal sont consignés dans les tableaux suivants :

Résistivité de la base ($\Omega.cm$)	0,5	1,0	3,0	6,0	10,0
η (%)	19,0	16,6	19,4	18,9	18,2

Épaisseur de la cellule (μm)	100	200	300	400	500	600	700	800
η(%)	19,3	16,6	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,6

Lorsque la résistivité de la base ρ varie de 0,5 à 10 $\Omega.cm$, on a constaté que le rendement de conversion est optimisé à 19 % correspondant à la plus petite valeur de ρ . Et pour une épaisseur de la cellule comprise entre 300 et 700 μm , nous avons observé une très légère amélioration du rendement qui est évaluée à 19,7%. Au-delà de cette fourchette, le rendement chute presque brusquement.

En perspective de ce travail, une étude sur deux cellules à émetteurs de type P, élaborés par les deux techniques paraît nécessaire pour compléter cette étude.

Bibliographie

- [1] Abderrezek. M, «Modélisation Des Cellules Solaires Tandem à Couches Minces et à Haut Rendement », Thèse de doctorat, Université de Setif-1 Algérie, 18-02-2015.
- [2] BAALLI .A, «Etude comparative entre les cellules solaires de type P^+ -AlGaAs /P-GaAs/n-GaAs et type n^+ -AlGaAs/h-GaAs/P-GaAs», diplôme de magister, Université Mohamed Kheider-Biskra.
- [3] BAKHTI. S, «Etude comparative des paramètres physiques des matériaux photovoltaïques à base de silicium monocristallin et poly-cristallin», diplôme de magister, Université Abou Bekr Belkid , Tlemcen.
- [4] BOUCARD. F, « Modélisation de la diffusion des dopants dans le silicium pour la réalisation de jonctions fines», Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 14 avril 2003
- [5] CHABANE.H, « Etude d'une cellule solaire a base de structure PIN», diplôme de magister Université Hadj Lakhdar, Batna, 10 /03 /2015.
- [6] CHOVET A. & Masson. P, « Physique des semi-conducteurs», Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille, 2004/2005.
- [7] CLUGSTON, D.A. and Basore, P.A., "PC1D Version 5: 32-bit Solar Cell Simulation on Personal Computers", 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (Sept 1997).
- [8] EUNHWAN Cho, Young-Woo, Lila D. Dahal, Arnab Das, Vijaykumar Upadhyaya, Ajeet Rohatgi, "Comparison of POCl₃ diffusion and phosphorus ion-implantation induced gettering in crystalline Si solar cells", Solar Energy Materials & Solar Cells 157 (2016) 245–249. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2016.05.057>
- [9] FOUTEM. F, «Etude de la contribution d'une couche BSF (Back Surface Field) sur les performances des cellules solaires en GaAs», diplôme de magister, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen.

- [10] LANTERNE. A, « Etude, réalisation et caractérisation de dopages par implantation ionique pour une application aux cellules solaires en silicium », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 4 November 2014.
- [11] LAURENT.C, Contribution a la réalisation de cellules photovoltaïques à concentration à base de silicium monocristallin » Thèse de doctorat, université Montpellier 2, Soutenue le 16/12/2014.
- [12] Mathieu. H. et Fanet. H., « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques », 6ème édition Dunod, Paris, 2009.
- [13] MEKELLECHE.M, « Modélisation et Simulation de Nouveaux Matériaux Destinés à la Production d'Energie Photovoltaïque », diplôme de master, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen 21 / 06/ 2015.
- [14] MIMOUNE.M, « Etude des capteurs photovoltaïques basés sur les nanotechnologies », Université du Québec À Trois-Rivières, mars 2016.
- [15] RAHMANI, I, « Etude et simulation de l'implantation ionique des dopants dans des structures MOS », diplôme de magister, Université Hadj Lakhdar, Batna.
- [16] RAJAKANAN, Singh, and Shewchun, "Absorption coefficient of silicon for solar cell calculations", Solid-State Electronics 22, p. 793 (1979).
- [17] ROVER, Basore, and Thorson, "Solar Cell Modeling on Personal Computers," 18th IEEE Photovoltaic Specialists Conf., Las Vegas (October 1985).
- [18] SAADI. S, « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan », diplôme de magistère, Université Mentouri, Constantine, 2010.
- [19] W. R. THURBER, R.L. Mattis, and Y.M. Liu & J.J. Filliben, "Semiconductor Measurement Technology: The Relationship Between Resistivity and Dopant Density for Phosphorus and Boron-Doped Silicon", Nat. Bur. Stand. (U.S.), Spec. Publ. 400-64, 53 pages (May 1981).