



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITÉ Saad DAHLAB BLIDA-1
Faculté de Technologie
Département des Energies Renouvelables



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique en :

Energies Renouvelables

Option : CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

Thème :

Investigation des profils de dopage du bore dans le Silicium de type n obtenus par simulation

Présenté par :

Melle. BELKADA Feriel

Soutenu devant le jury composé de :

Monsieur DOUMAZ Toufik	MAA USDB	Président
Monsieur BOUZAKI Moustapha Med	MCB USDB	Examineur
Monsieur BOUCHEHAM Abdelghani	MCA CRTSE	Encadreur

Octobre 2021

ملخص

في السياق العام للاستخدام المتنوع للموارد الطبيعية، الرجوع الى الطاقة المتجددة وبالأخص الطاقة الشمسية الكهروضوئية أصبح اقوى، ولهذا تطوير جديد من الخلايا الضوئية القائمة على اساس السليسيوم تبدو واعدة.

في هذه النمذجة والمحاكاة، نستخدم برنامج ادنا 2، لدراسة اداء الخلايا الشمسية القائمة على السليسيوم. نقيم في البداية، مختلف المراحل لحقن وتفعيل البور داخل خلية السليسيوم. نهتم بعد ذلك بعمق وتركيز مختلف العوامل وشوائب هذه الخلية الشمسية لدراسة مدى تأثير هذه الاخيرة على المرود الكهربائي.

كلمات مفتاحية: السيليكون، النوع n، الباعث، انتشار البورون، السيليكون، ادنا 2

Résumé

Dans le contexte global de la diversification de l'utilisation des ressources naturelles, le recours aux énergies renouvelables et en particulier le solaire photovoltaïque se fait de plus en plus fort. A ce titre, le développement d'une nouvelle génération de cellules photovoltaïques à base de Silicium semble prometteur. Dans ce travail de modélisation et de simulation, nous utilisons le logiciel EDNA 2, pour étudier les performances des cellules solaires à base de Silicium. Nous évaluons dans un premier temps, les différentes étapes de dopage de Bore pour une structure typique de jonction N. Par la suite nous nous intéressons à la concentration et à profondeur pour étudier l'influence de celles-ci sur les caractéristiques externes de la structure.

Mots Clés : Silicium, type n, émetteur, diffusion du Bore, courant de saturation, EDNA 2.

Abstract

In the global context of the diversification of the use of the natural resources, the recourse to renewable energies and in particular the solar photovoltaic is increasing. For this reason, the development of a new generation of photovoltaic cells based on silicone seems promising. In this work of modeling and simulation, we use the software EDNA 2, to study the performances of the solar cells based on silicone. We evaluate initially, the different stages of Bore doping for a typical structure N junction. Thereafter we are interested by the concentration and the depth to investigate the influence of these ones on the external parameters of the structure.

Keys Words: silicon, type n, transmitter, boron diffusion, saturation current, EDNA 2.

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce à DIEU le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté de mener à bien ce travail.

En préambule, je veux adresser tous mes remerciements au président du jury Monsieur DOUMAZ Toufik et au membre de jury Monsieur BOUZAKI Moustapha Mohammed pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

J'exprime mes vifs remerciements à Mr *LAFRI Djamel* "Chef du département des Energies Renouvelables"

Je remercie infiniment Monsieur *BOUCHEHAM Abdelghani* "Maitre de recherche A au CRTSE", d'abord d'avoir accepté de m'encadrer, ensuite pour lui exprimer ma reconnaissance de l'attention qu'il a porté à mon travail, ainsi que les connaissances qu'il m'a transmises, sa disponibilité et son soutien continu qui m'ont été d'une grande importance pour la concrétisation de ce mémoire.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur *DOUMAZ Toufik* "chef d'option conversion photovoltaïque à l'USDB", pour son aide précieuse, et sa disponibilité durant les cinq années précédentes.

Je saisis cette occasion pour remercier tous les enseignants du département des énergies renouvelables, à tous les enseignants de l'université de Blida
Ainsi qu'à toute l'équipe de chercheurs qui m'ont chaleureusement accueilli lors de mon stage au sein du CRTSE.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leurs aides et ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce travail en premier lieu

À ma mère bien aimée, qu'elle a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation. Ses conseils et surtout son sacrifice qui m'ont été d'une aide précieuse dans ma vie quotidienne. La roue de la vie tourne. Maintenant, c'est l'heur de te rendre un grand hommage.

« Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous »

À mon cher père, Tout l'encre du monde ne pourrait suffire pour exprimer mes sentiments envers un être très cher qui m'a indiqué la bonne voie en me rappelant que par la volonté et la persévérance on réalise toujours nos ambitions.

« Vous avez toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour, Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin. »

À ma sœur Sabrina et mon frère Zakaria, à mes grands-mères, tantes, oncles, cousins et cousines.

Une grande dédicace à tous mes amis qui ont partagé la joie de ce jour avec moi.

BELKADA Ferial

Symboles

Symbole		Unité
D	Coefficient de diffusion	(cm ² .s ⁻¹)
D0	Facteur de fréquence	(nombre photons/m ³ /s)
Ec	L'énergie de la bande de conduction	(Ev)
EFn	L'énergie de Fermi de l'électron	(Ev)
EFp	L'énergie du trou de Fermi	(Ev)
Ei	L'énergie intrinsèque	(Ev)
Et	L'énergie de l'état de défaut.	(EV)
Ev	L'énergie de la bande de valence	(Ev)
FF	Facteur de forme	(%)
G	Génération optique	()
I0	Courant de saturation de la diode	(A)
Icc	Courant de court-circuit	(A)
I_{max}	Courant maximal	(A)
I_{ph}	Photo courant	(A)
J0	Densité de courant	(A/m ²)
Jj	Le courant de collecte	(A/m ²)
K_B	Constante de Boltzmann (K _B = 1,38 10 ⁻²³ J.K ⁻¹)	(J.K ⁻¹)
Ln	Longueur de diffusion des électrons	(μm)
Lp	Longueur de diffusion des trous	(μm)
N	Coefficient d'additif	
n	Concentration libre des électrons	(cm ⁻³)
N(z)	La concentration nette de dopage ionisé	(cm ⁻³)
N0	Concentration initiale	(cm ⁻³)
ND et NA	Concentration substitutionnelle des donneurs et d'accepteur	(cm ⁻³)
ND + NA-	Concentrations du donneur et d'accepteur ionisé	(cm ⁻³)
ni_{eff}	La concentration effective des porteurs intrinsèques	(cm ⁻³)
ni	Intrinsèque carrier concentration	(cm ⁻³)
n₀, p₀	Concentration à l'équilibre (des électrons et des trous)	(cm ⁻³)
Ns	Concentration en surface	(cm ⁻³)
Nt	La concentration des états de défaut	(cm ⁻³)
p	Concentration libre des trous	(cm ⁻³)
Pinc	Puissance incidente	(W)
Pmax	Puissance maximal	(W)
q	Charge élémentaire (1,602. 10 ⁻¹⁹)	(Coulomb)
Qa	Energie d'activation du Bore	(J.mol ⁻¹)
Rs	Réponse spectrale	(A/W)
SRV_{eff}	La vitesse effective de recombinaison dans l'émetteur	(cm/s)

T	Température	(K)
t	Temps de diffusion	(s)
U_{Aug}	Recombinaison Auger	(m ⁻³ .s ⁻¹)
U_{rad}	Recombinaison radiative	(m ⁻³ .s ⁻¹)
U_{SRH}	Recombinaison SRH	(m ⁻³ .s ⁻¹)
U_{tot}	Recombinaison totale	(m ⁻³ .s ⁻¹)
V_{co}	La tension en circuit ouvert	(V)
V_j	La tension de la jonction	(V)
V_m	Tension maximal	(V)
v_{th e}, v_{th h}	Les vitesses thermiques des électrons et des trous	(cm/s)
Z_j ou X_j	La profondeur de jonction	(μm)
Z_p	Pic de concentration	(μm)
Δn et Δp	Concentration excessive (électrons et des trous)	(cm ⁻³)
η	Rendement	(%)
μ_{maj}	De la mobilité des porteurs majoritaires	(cm ² /V.s)
ρ_{sq}	La résistance carrée	(Ω/sq)
τ	La durée de vie	(μs)
τ_a	La durée de vie de chaque mécanisme	(μs)
τ_{eff}	La durée de vie effective	(μs)
τ	Durée de vie des électrons et des trous	(μs)
Φ	Flux des particule	(s ⁻¹)
σ_n et σ_p	Les sections efficaces de capture des électrons et des trous	(cm ²)

Abréviation et acronymes

APCVD	Atmospheric pressure chemical vapor deposition
AsGs	Arséniure de Gallium
B	Bore
B₂H₆	Diborane
B₂O₂	Oxyde de Bore
B₂O₃	Le TriOxyde de Bore
BBr₃	Tribromure de Bore
BCl₃	Trichlorure de Bore
BFS	Back surface Field
BN	Nitride de Bore
Br	Borure
BRL	Couche riche en Bore
BSG	Borosilicate
CAR	Couche antireflet
CdTe	Tellure de Cadmium
CIGS	Cuivre Indium Gallium Sélénium
CIS	Cuivre Indium Sélénium
CRTSE	Centre de Recherche En Technologie des Semi-Conducteurs Pour l'Energétique
CSV	Comma separated values (fichier de base des données recueillies)
Cz-Si	Silicium monocristallin
DDP	Différence de potentiel
DWS	Diamond wire sawing
ECV	Capacitance Voltage Profiling
ERFC	Fonction d'erreur complémentaire
EVA	Ethylène-Acétate de Vinyle
Ge	Germanium
GaAs	Arsenide
HCL	L'Acide Chlorhydrique
HF	Haute fréquence
IR	Infrarouges
ITRPV	International Technology Roadmap for Photovoltaic
KOH	Hydroxyde de Potassium
MWSS	Le Metropolitan Waterworks and Sewerage System

NaOH	L'HydrOxyde de Sodium
PEG	Polyéthylène glycol
Ph	Phosphore
PV	Photovoltaïque
Se	Sélénium
Si	Silicium
SiC	Carbure de Silicium
SiH4	Silane
SiH₄	Tétrahydure de Silicium
SiHCl₃	Trichlorosilane
SIMS	Spectrométrie de masse des ions secondaire
SiN-H	Silicium Hydrogéné
SiN_x	Nitride de Silicium
SiO₂	DiOxyde de Silicium
SRH	Schokley Read Hall
TMB	Trimethylborate
ZCE	Zone de charge d'espace

Sommaire

Résumé	I
Remerciements	II
Dédicaces	III
Symboles	IV
Abréviation et acronymes	VI
Introduction générale.....	XIV
Chapitre I : La production photovoltaïque	1
I.I. Introduction	1
I.II. Les cellules solaires photovoltaïque.....	1
I.II.1 Technologies des cellules solaires	1
I.II.1.1 Silicium monocristallin	1
I.II.1.2 Silicium polycristallin	1
I.II.1.3 Le Silicium amorphe.....	1
I.II.1.4 Tellurure de Cadmium (CdTe).....	2
I.II.1.5 Cuivre Indium Sélénium (CIS) / Cuivre Indium Gallium Sélénium (CIGS).....	2
I.II.1.6 Organiques	2
I.II.2 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule à base de Silicium	2
I.II.3. Caractéristique d'une cellule solaire	3
I.II.3.1. Le courant de court-circuit I_{cc}	3
I.II.3.2 La tension en circuit ouvert V_{co}	3
I.II.3.3 Le facteur de forme FF	4
I.II.3.4 Le rendement de conversion d'énergie η	4
I.II.3.5 La réponse spectrale R_s	4
I.III. Notion sur les semi-conducteurs	5
I.III.1. Type des semi-conducteurs.....	5
I.III.1.1. Semi-conducteurs intrinsèques :	5
I.III.1.2. Semi-conducteurs extrinsèques :	5
I.III.2. Dopage des semi-conducteurs	5
I.III.2.1. Dopage de type n	5
I.III.2.2. Dopage de type p	6
I.III.3. La jonction PN.....	6
I.III.3.1. Jonction PN non polarisée	7
I.III.3.2. Jonction PN polarisée	7
I.IV. La production d'un module photovoltaïque.....	8
I.IV.1. Production et purification du Silicium.....	8
I.IV.1.1. Silicium métallurgique	9
I.IV.1.2. Silicium solaire.....	9
I.IV.1.3. Silicium électronique.....	9
I.IV.2 Cristallisation et découpage des lingots.....	10
I.IV.3 Elaboration des wafers	11
I.IV.4 Processus de fabrication des cellules	11
I.IV.5. Assemblage et encapsulation.....	12
Chapitre II : La diffusion du Bore dans le Silicium	15
II.I. Introduction.....	16

II.II. Le Silicium	16
II.II.1. Structure cristallographique	16
II.III. Les principales technologies de cellules photovoltaïques de type n	16
II.IV. Notions théoriques de la diffusion thermique dans le Silicium	17
II.IV.1. Historique de la diffusion	17
II.IV.2. Principe de la diffusion	17
II.IV.3. Description chimique des étapes de réalisation d'un dopage type P	19
II.IV.4. Mécanisme de diffusion à l'échelle atomique.....	22
II.IV.4.1. Mécanisme lacunaire.....	22
II.IV.4.2. Mécanisme interstitiel	22
II.IV.5. Equations de diffusion	23
II.IV.5.1. Première loi de FICK	23
II.IV.5.2. Deuxième loi de FICK	24
II.IV.6. Coefficient de diffusion.....	27
II.V. Phénomènes de génération et de recombinaison	28
II.V.1. La recombinaison	28
II.V.1.1. Recombinaison radiative	28
II.V.1.2. Recombinaison Auger	28
II.V.1.3. Recombinaison bande à bande	29
II.V.1.4. Recombinaison Schokley Read Hall	29
II.V.1.5. Recombinaison de surface	29
II.V.2. Génération	30
II.VI. Les pertes d'une cellule solaire en Silicium	30
II.VI.1. Les pertes physiques	30
II.VI.2. Les pertes technologiques	31
II.VII. Technologie pour minimiser les pertes	31
II.VII. L'intérêt du Silicium de types N	32
II.VI. Conclusion	34
Chapitre III : Partie expérimentale	35
III.I. Introduction	36
III.II. Description du logiciel de simulation EDNA 2	36
III.II.1. Aperçu des programmes de simulation PV	36
III.II.2. PV Lighthouse.....	36
III.II.3. Procédure générale du logiciel EDNA 2	37
III.II.4. Le calculateur de la résistance carrée	38
III.II.5. Le calculateur de la bande interdite	39
III.II.6. Le calculateur des recombinaisons	39
III.II.7. Équations pour le profil de dopage.....	40
III.III. La simulation par EDNA 2.....	41
IV. Conclusion	43
Chapitre IV : Résultats et discussion	44
IV.I. Introduction	45
IV.II. Description de la structure utilisée	45
IV.III. Paramètres de la simulation	46
IV.IV. L'effet des principaux paramètres du procédé de diffusion sur la jonction p+	47

IV.IV.1. L'effet de la concentration sur l'épaisseur de la jonction pour différentes profondeurs	47
IV.IV.2. L'effet de la concentration sur la densité de courant de saturation pour plusieurs profondeurs.....	48
IV.IV.3 L'effet du pic de concentration Z_p et du facteur de profondeur Z_f sur l'épaisseur de la jonction p^+	51
IV.IV.4. L'effet du pic de concentration Z_p et du facteur de profondeur Z_f sur la densité de courant de saturation de la jonction p^+	55
IV.V. Conclusion	62
Conclusion générale	63
Références bibliographiques	65

Figure (I. 1): Type des cellules.....	2
Figure (I. 2): Structure d'une cellule photovoltaïque.....	3
Figure (I. 3): Points et valeurs remarquables de la caractéristique courant – tension	4
Figure (I. 4): Comportement dopant du Bore (B) et du Phosphore (P) dans le Silicium	6
Figure (I. 5): Formation de la jonction PN	7
Figure (I. 6): polarisation d'une jonction PN.....	8
Figure (I. 7): Grains de Silicium de différentes tailles.....	9
Figure (I. 8): Intérieur du four HEM du CRTSE	10
Figure (I. 9): Lingot fixé par une résine avant le découpage	10
Figure (I. 10): Dispositif de découpage des lingots	10
Figure (I. 11): Briquette du CRTSE	10
Figure (I. 12): Dispositif de sciage	12
Figure (I. 13): Schéma explicatif du sciage	12
Figure (I. 14): Schéma réalisée sur les composantes d'une cellule.....	12
Figure (I. 15): Schéma réalisée sur la composition d'un panneau solaire.....	14
Figure (II. 1): Structure cristalline du Silicium (Si).....	16
Figure (II. 2): Four Tempress de CRSTE	18
Figure (II. 3): Les procédé de diffusion : a) source solide, b) source liquide, c) source gazeuse.....	21
Figure (II. 4): Schéma de principe de la migration du dopant selon le mécanisme lacunaire	22
Figure (II. 5): Schéma de principe de migration du dopant via les mécanismes interstitiels : a) migration par paire ; b) mécanisme de kick-out.....	23
Figure (II. 6): Variation de la concentration d'atomes additifs en fonction de la profondeur du semi-conducteur.....	24
Figure (II. 7): Variation du flux d'atomes d'additifs en fonction de la profondeur du semi-conducteur.....	25
Figure (II. 8): Variation du coefficient de diffusion intrinsèque du Silicium en fonction de la température pour différentes impuretés.....	27
Figure (II. 9): Type de recombinaison.....	30
Figure (III. 1): Diagramme des modèles physiques utilisés par les calculateurs PV Lighthouse	37
Figure (III. 3): Interface du calculateur EDNA 2 / émetteur.....	42
Figure (III. 4): Interface du calculateur de la résistance carrée.....	43
Figure (IV. 1): Description schématique de la structure étudiée	45
Figure (IV. 2): Profil de concentration du Bore.....	47
Figure (IV. 3): La variation de la densité de courant de saturation en fonction de la vitesse effective de recombinaison en surface de l'émetteur.	49
Figure (IV. 4): Profil de concentration du Bore pour une dose de $1.e+19 \text{ cm}^{-3}$	51
Figure (IV. 5): Profil de concentration du Bore pour une dose de $5.e+19 \text{ cm}^{-3}$	52
Figure (IV. 6): Profil de concentration du Bore pur une dose de $1.e+20 \text{ cm}^{-3}$	53
Figure (IV. 7): Profil de concentration du Bore.....	54
Figure (IV. 8): La variation de la densité de courant surfacique en fonction de l'effective SRV pour une concentration de $1.e+19 \text{ cm}^{-3}$	55
Figure (IV. 9): La variation de la densité de courant surfacique en fonction de l'effective SRV pour une concentration de $5.e+19 \text{ cm}^{-3}$	56
Figure (IV. 10): La variation de la densité de courant surfacique en fonction de l'effective SRV pour une concentration de $1.e+20 \text{ cm}^{-3}$	57

Tableau (III. 1): Equations de recombinaison présentées par EDNA 2.	40
Tableau (III. 2): Equations de profile de dopage (Zf : forme gaussienne et ERFC).	40
Tableau (III. 3): Equations des profils de dopage (Zf : forme écart type).	41
Tableau (IV. 1): Paramètres de simulation de la jonction.....	46
Tableau (IV. 2): Résultats obtenue pour $Z_p = 0$	49
Tableau (IV. 3): Tableau des résultats obtenues à $1.e+19 \text{ cm}^{-3}$	59
Tableau (IV. 4): Tableau des résultats obtenues à $5.e+19 \text{ cm}^{-3}$	60
Tableau (IV. 5): Tableau des résultats obtenue à $1.e+20 \text{ cm}^{-3}$	61

Introduction

générale

Introduction générale

La nécessité de promouvoir un accès universel à une énergie durable fait du domaine de l'énergie un axe de développement majeur autour duquel de nombreuses recherches se concentrent. L'objectif ultime de toutes ces recherches est le développement d'un futur mix énergétique à faible empreinte carbone. Actuellement, la consommation mondiale d'énergie est très majoritairement satisfaite par les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel) polluants en carbone. Ces derniers assurent près de 85% de la consommation mondiale en énergie. Quant aux énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque), elles assurent environ 3% de la consommation mondiale. Afin de parvenir à une énergie dé-carbonée, la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique devrait considérablement augmenter. D'énormes efforts sont donc actuellement entrepris à l'échelle mondiale pour le développement de ces énergies renouvelables, dites également "propres". Dans le secteur photovoltaïque, les attentes sont nombreuses : l'augmentation de l'efficacité de conversion, la diminution des coûts de production, l'abaissement de l'impact environnemental, etc. Actuellement, la filière est largement dominée par la technologie Silicium cristallin avec près de 93% de la production mondiale en 2016.

Le Silicium est utilisé dans la cellule photovoltaïque (constituant des panneaux solaires) sous forme ultra pure. C'est le deuxième élément le plus courant de la croûte terrestre et le composant principal du sable. Le Silicium ne se rencontre jamais pur, mais sous forme de composés : la silice, le DiOxyde de Silicium (SiO_2) ou encore dans les silicates... Il entre presque tout le temps dans la composition du verre. Même si la conduction du Silicium est inférieure à celle de nombreux métaux, il entre très souvent, en tant que matériau semi-conducteur, dans la composition des cellules solaires photovoltaïques ou dans la micro-électronique. Ses propriétés semi-conductrices ont permis l'apparition des transistors et des circuits intégrés. Pour cela, les circuits électroniques sont gravés sur Silicium par lithographie. Chaque panneau est composé de cellules photovoltaïques assemblées en série de façon à atteindre une tension d'au moins 12 volts. Chaque cellule est principalement composée de Silicium, matériau semi-conducteur : il présente un aspect noir uni dans le cas de panneau solaire monocristallin, ou un aspect de mosaïque légèrement bleuté dans le cas d'un panneau solaire poly-cristallin.

Parmi les avantages de Silicium, la possibilité qu'il soit dopé et de changer le type de porteurs ainsi que l'ordre de grandeur de sa conductivité, a permis d'envisager de nombreuses applications concernant la réalisation de diverses structures électroniques. Il y a donc eu de

rapides progrès dans l'étude du Silicium depuis 1975, date à laquelle les premières expériences de dopage ont été mentionnées. Le dopage au Bore du au Silicium en faibles concentrations est utilisé pour le rendre intrinsèque et obtenir une conductivité minimum. Ce matériau est l'élément actif de nombreux dispositifs électroniques comme les cellules solaires, les photorécepteurs et les transistors en couches minces (TFT). Les dopages élevés sont nécessaires pour réaliser les structures p-n ou p-i-n ou pour obtenir des contacts ohmiques sur le matériau intrinsèque par l'introduction d'une forte concentration d'atomes dopants.

Notre but principal dans ce travail est l'identification des différents paramètres électriques et technologiques qui influent actuellement sur les cellules photovoltaïques à base de Silicium en se focalisant surtout sur l'amélioration de la qualité de passivation d'une jonction de type N de ce dispositif. Pour cela, une étude de simulation et de conception d'une structure spécifique de cellule solaire à base de Silicium a été menée dans le but d'obtenir une structure électrique optimal. Dans ce travail de modélisation et de simulation, nous utilisons le logiciel EDNA 2, pour étudier les performances de la cellule.

Notre mémoire comporte quatre chapitres. Nous avons commencé dans le premier chapitre par présenter l'énergie photovoltaïque en se focalisant sur le Silicium, décrivant son processus de purification.

Le deuxième chapitre a été consacré aux différentes techniques pour introduire le dopage dans les matériaux semi-conducteur.

Le troisième chapitre, nous avons présenté la modélisation et la simulation sous environnement EDNA 2, en décrivant le dopage par diffusion thermique, nous avons passé en revue les différentes étapes de simulation.

Dans le dernier et quatrième chapitre nous avons utilisé le logiciel EDNA 2 dans le but d'optimiser la structure d'une cellule solaire à base de Silicium. Nous avons par la même occasion, déterminé l'influence des paramètres électroniques et technologiques, tels que la concentration, pic de concentration et le facteur de profondeur sur les performances du dispositif.

Le travail a été terminé par une conclusion générale.

Chapitre I : La production photovoltaïque

I.I. Introduction

L'énergie solaire est une énergie diffusée par les rayonnements du soleil. Elle peut être utilisée comme une source renouvelable pour produire de l'électricité ou de la chaleur selon le mode d'exploitation ou le besoin [1, 2].

La photovoltaïque désigne la production d'une tension à partir de la lumière. Ce phénomène consiste à établir une force électromotrice (énergie électrique de type continu) lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière [3].

Dans ce chapitre, nous décrivons l'énergie photovoltaïque, les étapes de fabrication des cellules à base de Silicium. Ensuite, nous détaillons les étapes de purification le Silicium grade solaire et l'élaboration du lingot. L'étape du sciage pour le découpage de lingot en briquettes et en plaquettes est abordée. Enfin, nous citons les étapes de l'encapsulation pour produire le panneau solaire.

I.II. Les cellules solaires photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est une composante optoélectronique qui transforme directement la lumière solaire en électricité, elle a été découverte par E. Becquerel en 1839 [4]. Une cellule photovoltaïque est constituée d'un matériau semi-conducteur, généralement le Silicium. Il existe d'autres matériaux utilisables tel que : Arséniure de Gallium (AsGa), Tellure de Cadmium (CdTe).

I.II.1 Technologies des cellules solaires

I.II.1.1 Silicium monocristallin

Il est élaboré à partir de Silicium cristallisé en un seul cristal par le procédé de Czochralski ou par purification. C'est un matériau qui présente les meilleures propriétés électroniques grâce à sa structure qui est composée d'un réseau régulier [5].

I.II.1.2 Silicium polycristallin

La structure de ce matériau se situe entre celle du Silicium monocristallin et celle de l'amorphe. Son élaboration est faite à partir d'un bloc de Silicium cristallisé en formes de cristaux multiples. Il est le plus utilisé dans l'industrie photovoltaïque grâce à son faible coût et sa grande efficacité d'environ 16 % [6].

I.II.1.3 Le Silicium amorphe

Les cellules amorphes sont composées de Silicium Hydrogéné c'est-à-dire non cristallin. C'est un matériau préparé par pulvérisation cathodique [7]. (Ejection d'atome d'une surface d'un matériau solide lorsqu'il est soumis à un bombardement par un flux) [8], déposé sur un

substrat comme le verre, l'acier inoxydable ou des feuilles de polymères [9]. Ces cellules présentent un rendement de conversion inférieur à ceux des couches massives.

I.II.1.4 Tellure de Cadmium (CdTe)

Le CdTe est un semi-conducteur approprié à la production de module PV de surface importante. Il s'agit d'une technologie extrêmement prometteuse, permettant d'obtenir des rendements tout à fait convenables (16,5% en laboratoire).

I.II.1.5 Cuivre Indium Sélénium (CIS) / Cuivre Indium Gallium Sélénium (CIGS)

Cette filière présente un fort potentiel de développement dans le futur (jusqu'à 20% de rendement en laboratoire). Cependant, les matériaux nécessaires à la fabrication de ce type de cellule ne sont pas disponibles en grandes quantités [10].

I.II.1.6 Organiques

Les matériaux fondamentaux de cette technologie sont des composés organique ou plastique appelés polymère [1]. Elles sont faciles à fabriquer, et avec un faible coût. Ils sont disponibles au marché. Leurs durées de vie actuelle sont environ 1000 heures [11].

Actuellement, Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont à base de Silicium [12]. Cependant, nous allons intéresser à la cellule solaire à base du Silicium multicristallin dont le Centre de Recherche en Technologie des Semi-conducteurs pour l'Energétique (CRTSE) la fabrique.

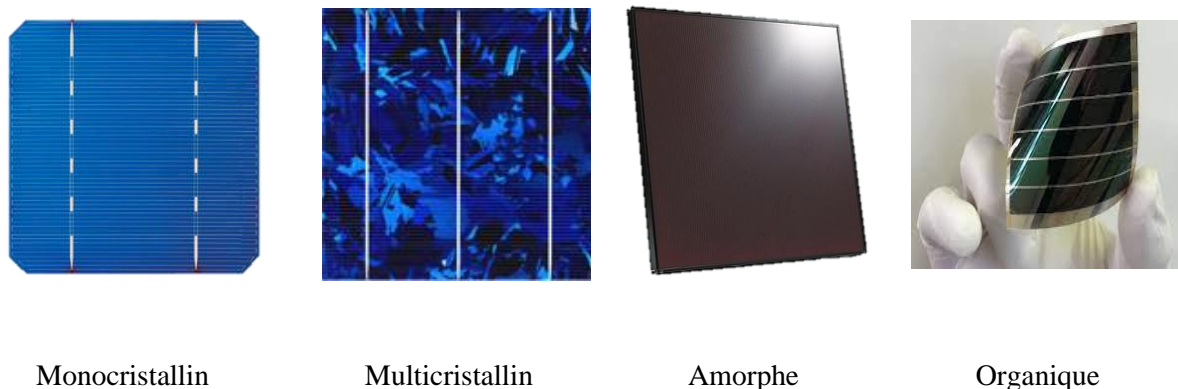


Figure (I. 1) : Type des cellules [13].

I.II.2 Structure et principe de fonctionnement d'une cellule à base de Silicium

La structure de base d'une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de Silicium, une dopée P (dopée au Bore) et l'autre dopée N (dopée au Phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de

cathode, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face de la zone P du cristal et joue le rôle d'anode [1, 14].

La transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique est basée sur les trois mécanismes suivants [15] :

- Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif ;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trous dans le matériau semi-conducteur ;
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

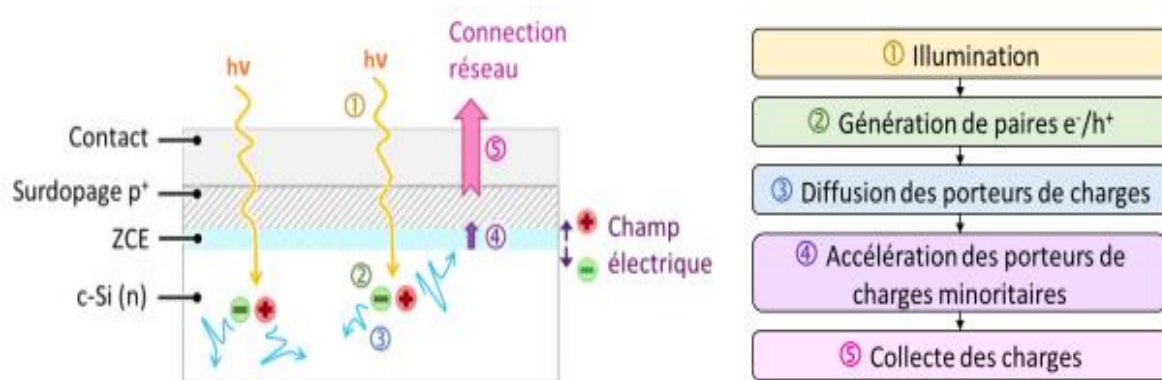


Figure (I. 2) : Structure d'une cellule photovoltaïque [16].

I.II.3. Caractéristique d'une cellule solaire

I.II.3.1. Le courant de court-circuit I_{cc}

Il définit la quantité des paires électron-trou créé G et qui traverse la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et trous (L_n et L_p) respectivement.

$$I_{cc} = I_{ph} = q G (L_n + L_p) \tag{I. 1}$$

Avec :

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

G : génération optique.

L_n et L_p : longueur de diffusion des électrons et des trous selon l'ordre.

I.II.3.2 La tension en circuit ouvert V_{co}

C'est la tension pour laquelle la diode à l'obscurité ($I = 0$) fournit un courant égal au courant de court-circuit I_{cc} . Elle est obtenue à partir de l'équation [17] :

$$V_{co} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1 \right) \tag{I. 2}$$

Avec :

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

T : température (K).

I_0 : courant de saturation de la diode.

I.II.3.3 Le facteur de forme FF

Il définit l'efficacité de la cellule solaire, il est obtenu comme suit [17] :

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (I. 3)$$

V_m : tension maximale.

I_m : courant maximal

I.II.3.4 Le rendement de conversion d'énergie η

C'est le rapport de la puissance maximale générée et de la puissance du rayonnement solaire incident.

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} \quad (I. 4)$$

I.II.3.5 La réponse spectrale R_s

C'est le rapport entre le courant de court-circuit généré par la cellule et la puissance lumineuse incidente en fonction des différentes longueurs d'onde formant le rayonnement incident. La réponse spectrale R_s est donnée par la relation suivante [17] :

$$R_s = \frac{I_{cc}}{P_{inc}} \quad (I. 5)$$

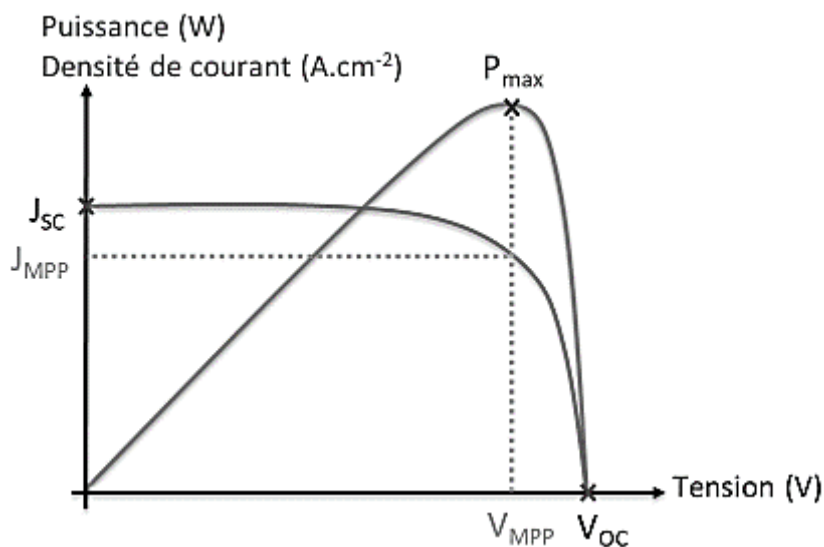


Figure (I. 3) : Points et valeurs remarquables de la caractéristique courant – tension [17].

V_{MPP} : tension correspond au point de puissance maximal

J_{MPP} : courant correspond au point de puissance maximal

I.III. Notion sur les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des corps solides dont la conductivité électrique se situe entre celle des métaux et celle des isolants. Les principaux semi-conducteurs sont le Germanium (Ge), le Silicium (Si), le Sélénium (Se), les composés binaires : Arséniure [18].

I.III.1. Type des semi-conducteurs

I.III.1.1. Semi-conducteurs intrinsèques :

Sont des matériaux, en principe, chimiquement purs et structurellement parfaits. Leur caractéristique principale est qu'à toute température, les concentrations d'électrons dans la bande de conduction et des trous dans la bande de valence sont égales [19, 20].

I.III.1.2. Semi-conducteurs extrinsèques :

Sont des matériaux dopés par des impuretés, dont la nature et la concentration de ces impuretés provoquent un déplacement du niveau de Fermi. Selon le porteur de charge majoritaire nous aurons un semi-conducteur de type :

N, si ce sont des électrons(e) dans la bande de conduction ;

P, si ce sont des trous (p) dans la bande de valence.

I.III.2. Dopage des semi-conducteurs

Le dopage est une méthode permettant de réaliser la jonction P-N. Cela consiste à introduire des impuretés dans un cristal intrinsèque pour modifier ces propriétés électriques.

Le dopage est effectué par l'introduction dans la phase vapeur d'une quantité contrôlée de l'élément dopant [21].

Le semi-conducteur dopé est alors appelé "semi-conducteur extrinsèque". Il existe deux types d'impuretés dopantes : celles à caractère donneur type n (Négatif) et celles à caractère accepteur type p (Positif).

I.III.2.1. Dopage de type n

Le dopage de type n consiste à ajouter un atome de Phosphore au sein de la structure cristalline du Silicium. Le Phosphore disposant de 5 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de Silicium, laissant ainsi libre un électron : Cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale négative.

I.III.2.2. Dopage de type p

Le dopage de type p consiste à ajouter un atome de Bore au sein de la structure cristalline du Silicium. Le Bore disposant de 3 électrons sur sa couche électronique externe va s'associer avec 4 atomes de Silicium, laissant ainsi libre un trou :

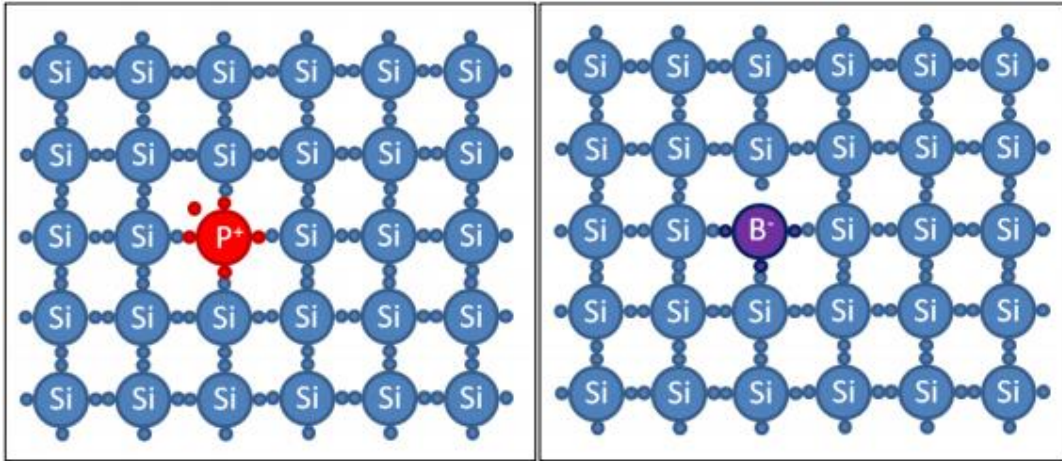


Figure (I. 4) : Comportement dopant du Bore (B) et du Phosphore (P) dans le Silicium [22].

I.III.3. La jonction PN

Une jonction PN est la mise en contact entre un semi-conducteur type N et un semi-conducteur type P issus d'un même cristal [23]. Lorsque la région dopée p est mise en contact avec la région n, les électrons et les trous diffusent spontanément de part et d'autre de la jonction, créant ainsi une zone de déplétion, ou zone de charge d'espace (ZCE), où la concentration en porteurs libres est quasiment nulle. Dans cette zone le nombre d'électrons et de trous libres est négligeable ; en faisant $n = p = 0$ [24].

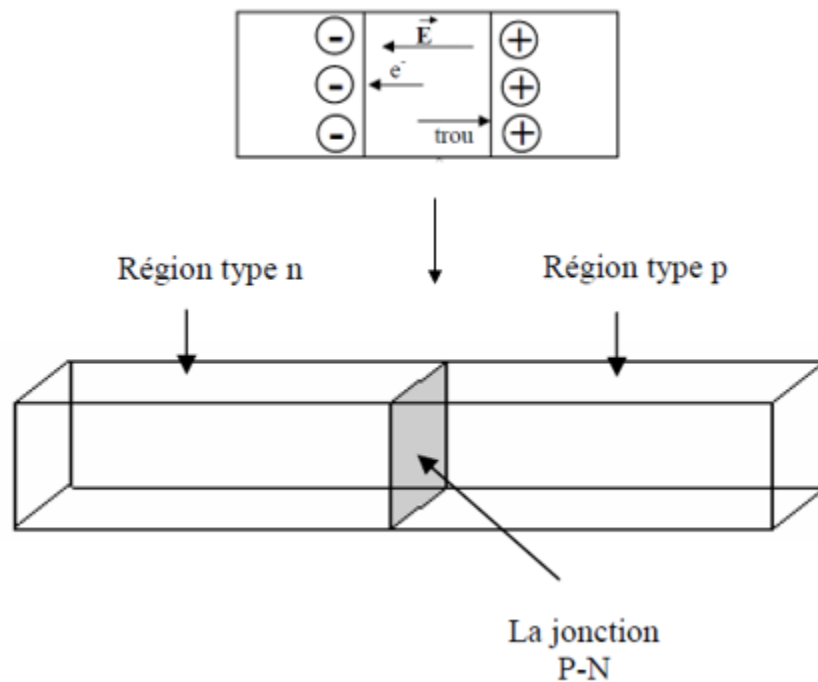


Figure (I. 5) : Formation de la jonction PN [25].

I.III.3.1. Jonction PN non polarisée

Au niveau de la jonction PN :

Les électrons libres de la partie N diffusent vers les trous disponibles de la partie P. Les trous disponibles de la partie P diffusent vers la partie N et piègent des électrons. Il y a une recombinaison électron-trou.

Les parties P et N étant initialement neutres, la diffusion des électrons et des trous a pour effet de charger positivement la partie N, négativement la partie P d'où la création d'un champ électrique interne. Ce champ repousse les porteurs majoritaires de chaque partie et arrête la diffusion (Figure 7). Entre les deux parties P et N apparaît alors une d.d.p de l'ordre de 0,7 V pour le Silicium, 0,3 V pour le Germanium.

I.III.3.2. Jonction PN polarisée

- **Polarisation en direct** : Dans le cas de la polarisation directe de la jonction PN, un champ externe est généré en sens inverse du champ interne, ce qui permet d'obtenir le passage des porteurs et donc le passage du courant Figure (I.6.a) [26].
- **Polarisation en inverse** : Si on inverse la polarisation du circuit, on obtiendra un champ externe dans le même sens que le champ interne, ce qui rend impossible le

passage des porteurs majoritaires, et ne laisse passer que les porteurs minoritaires
Figure (I.6.b) [26].

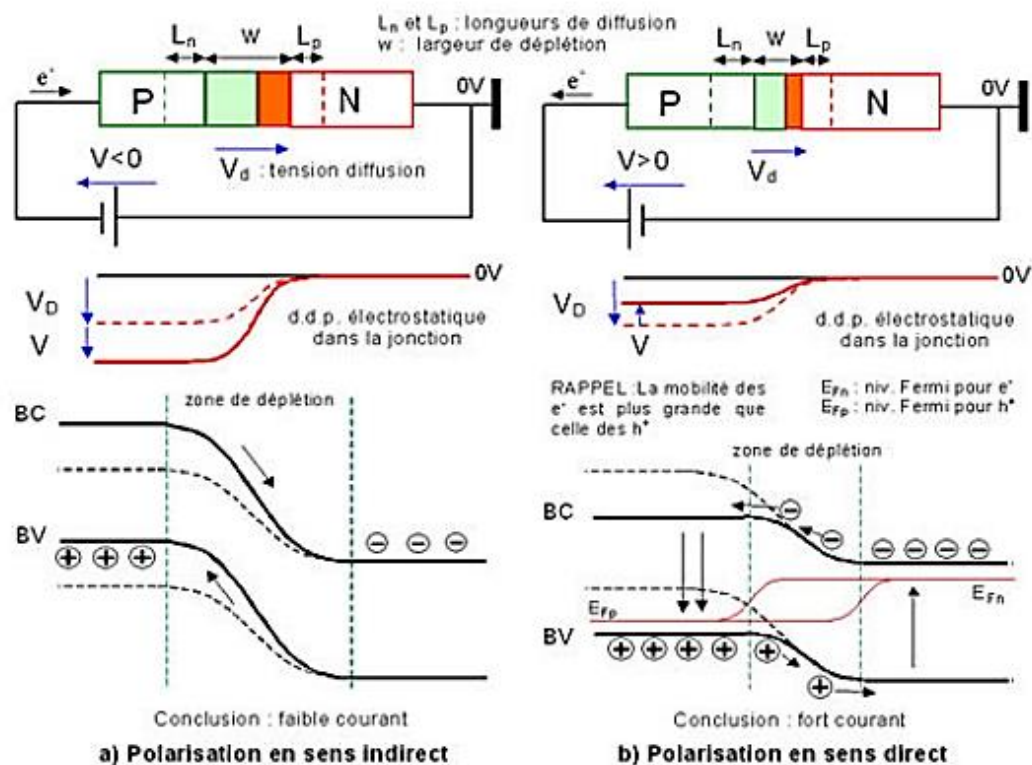


Figure (I. 6) : polarisation d'une jonction PN [23].

I.IV. La production d'un module photovoltaïque

La production des modules photovoltaïques est effectuée en cinq étapes [27] :

- Extraction et purification de Silicium ;
- Cristallisation de Silicium et formation de lingot ;
- Découpage de lingot de Silicium en wafers ;
- Traitement des wafers et obtention des cellules solaires ;
- Assemblages des cellules et encapsulation.

I.IV.1. Production et purification du Silicium

Le Silicium est l'élément 14 du tableau périodique, il fait partie du groupe cristallogène, il est le second élément le plus abondant dans la croûte terrestre après l'oxygène. Il représente près de 28 %. Cependant il n'existe pas à l'état natif, mais sous forme d'Oxydes (la silice) ou de silicates, qui sont des composés extrêmement stables. Selon l'utilisation industrielle du Silicium, un degré de pureté est exigé comme suit [28, 29] :

- **98-99%**: Silicium métallurgique, (MG-Silicium), alliages d'aluminium, silicones ;
- **99,999 9%**: Silicium solaire (SoG-Silicium), cellules photovoltaïques ;

- **Haute pureté 99,999999..%** : Silicium électronique, EG-Silicium (grade électronique), puces électroniques.



(1mm au 3 cm)



(3cm au 10 cm)

Figure (I. 7) : Grains de Silicium de différentes tailles.

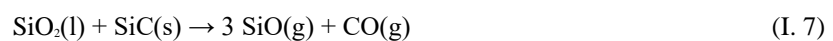
I.IV.1.1. Silicium métallurgique

Le Silicium dit « métallurgique » est obtenu par réduction de la silice par le carbone à haute température, dans des fours à arc. Selon la réaction suivante [27] :



Le four électrique contient deux zones :

Une zone inférieure chaude, où la température dépasse 1900 °C,



Une zone supérieure plus froide :



I.IV.1.2. Silicium solaire

Le Silicium solaire (SoG-Si), plus connu dans la filière électronique, est obtenu par la purification du Silicium métallurgique et servira à la confection des lingots de Silicium. Il existe différents procédés de production de Silicium de qualité solaire que l'on peut classer en deux grandes familles : la voie chimique et la voie métallurgique.

I.IV.1.3. Silicium électronique

Le Silicium de qualité électronique exige une très grande pureté. Il est élaboré par voie gazeuse, le Silicium de qualité métallurgique est attaqué à haute température par HCl pour donner du Trichlorosilane (SiHCl_3) qui est gazeux. Ce Trichlorosilane est purifié par distillation, puis converti en silane, SiH_4 , lequel par dissociation thermique donne un Silicium

de grande pureté. Ce traitement nécessite une purification complémentaire qui est apportée par la ségrégation qui intervient lors de la fabrication des lingots [27].

I.IV.2 Cristallisation et découpage des lingots

Le principe d'élaboration des lingots de Silicium polycristallin est basé sur une méthode de solidification orientée dans un creuset en silice fixe, soumise à un écoulement de chaleur unidirectionnelle. La température de fusion sera légèrement supérieure à 1420 °C.

Après l'étape de la fusion une perte thermique est créée au fond du creuset et le Silicium solidifier progressivement du bas vers le haut.

La phase suivante consiste à récupérer le lingot par retournement du creuset en utilisant les propriétés de l'agent encapsulant (matériaux ajoutés à la charge permettent d'éviter la contamination du Silicium par le creuset et facilite la récupération du lingot) [30].

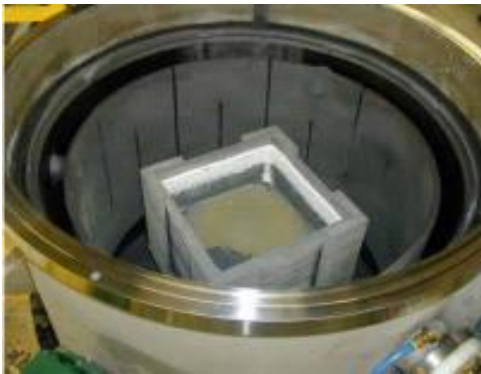


Figure (I. 8) : Intérieur du four HEM du CRTSE.



Figure (I. 9) : Lingot fixé par une résine avant le découpage.

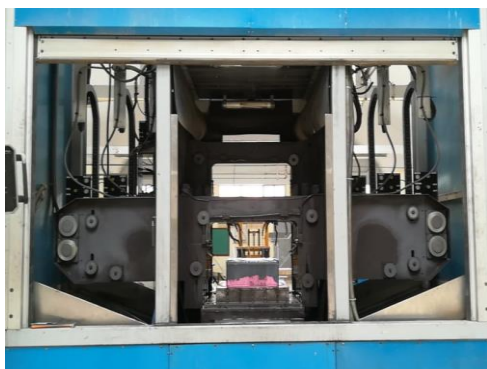


Figure (I. 10) : Dispositif de découpage des lingots.



Figure (I. 11) : Briquette du CRTSE.

Le lingot obtenu est découpé à l'aide d'une scie à fil diamanté DWS (*Diamond wire sawing*) pour obtenir des briquettes. Dans cette technique, les grains abrasifs de diamant de diamètre 8-10 microns sont fixés sur un fil d'acier central par galvanoplastie de deux couches du nickel ou par électro-placage d'une résine, comme le montre la figure (I.9).

Les particules de diamant jouent un rôle prépondérant dans la fabrication des plaquettes de Silicium, en raison de la meilleure qualité et la réduction des déchets de Silicium. Au cours de processus du sciage, les lingots de Si cristallin sont découpés par le fil diamanté. Un liquide de refroidissement à base d'eau est introduit pour faciliter le découpage [31].

I.IV.3 Elaboration des wafers

Un wafer est une tranche ou une galette de Silicium. Après divers traitements, le wafer devient une cellule photovoltaïque.

Les briquettes sont découpées en plaquettes à l'aide d'une scie à le fil métallique (MWSS) par l'action abrasive des particules de Carbure de Silicium (SiC) suspendues dans une boue à base de Polyéthylène glycol (PEG).



Figure (I. 12) : Dispositif de sciage.

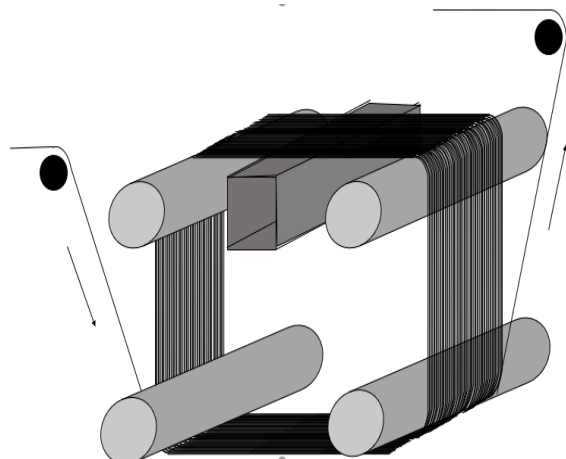


Figure (I. 13) : Schéma explicatif du sciage.

Par la suite ces plaquettes de Silicium vont être enrichi en éléments dopant afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur.

I.IV.4 Processus de fabrication des cellules

Les plaquettes de Silicium vont subir un traitement physico-chimique pour les transformer en semi-conducteur comme suit [32] :

- Traitement de la surface des plaquettes wafers et texturation ;
- Formation de la jonction n+ /p ou de la structure n+ /pp+ ;
- Isolation de la jonction parasite ;
- Passivation de la surface et des joints de grains ;
- Métallisation : dépôt de la grille collectrice et du contact arrière ;
- Dépôt de la couche antireflet (C.A.R).

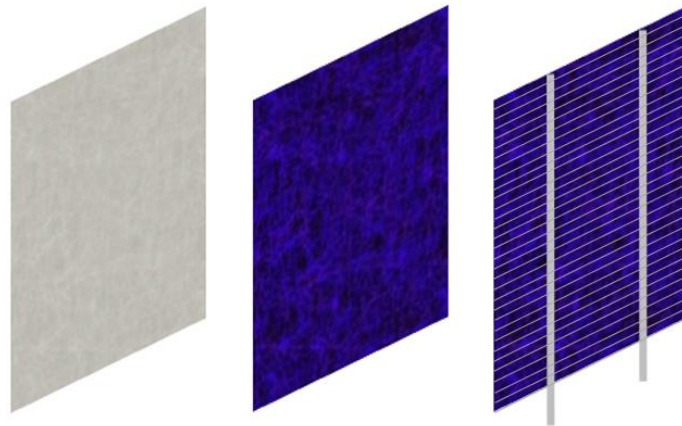


Figure (I. 14) : Schéma réalisée sur les composantes d'une cellule.

I.IV.5. Assemblage et encapsulation

Les phases de montage d'un module photovoltaïque sont les suivantes :

Contrôle des cellules et soudure des lamelles d'étain

Les cellules sont contrôlées visuellement par une personne, une machine ou par un contrôle caméra. Par la suite, plusieurs opérateurs effectuent le soudage de deux lamelles d'étain sur la partie supérieure de la cellule. Cette soudure consiste à créer la jonction électrique entre les cellules.

Montage de chaînes et matrices

Après avoir connecté les cellules entre elles (une chaîne de dix cellules par exemple), un test de puissance électrique est effectué pour vérifier qu'il n'y a pas eu de problème pendant le montage. Ces chaînes sont posées les unes à côté des autres et les soudent entre elles, tout en construisant une matrice. Une fois soudée, la matrice subit un deuxième test de puissance électrique. Les cellules sont relâchées, sur une feuille d'EVA (éthylène-Acétate de Vinyle).

Couche EVA

C'est une résine transparente, traitée thermiquement entre 150 et 160°C dont le rôle est de renforcer la robustesse du module solaire et d'éviter la pénétration d'humidité. On ajoute ensuite une autre feuille d'EVA et enfin la feuille de Tedlar (polycarbonate).

Face arrière du module

L'arrière du module est constitué d'un film multicouche Tedlar-aluminium-Tedlar. L'aluminium dont le rôle prouvé contre l'humidité et les chocs mécaniques. il est mis en sandwich entre deux feuilles de Tedlar de 180 μm d'épaisseur. Son rôle est de protéger le module contre les intempéries.

Face avant du module

Elle est constituée d'un verre d'épaisseur 3 à 5 mm. Ce verre doit avoir un facteur de transmission très élevé ($\tau = 95\%$) afin de permettre aux rayons solaires d'atteindre les cellules solaires, comme il doit être suffisamment résistant à la grêle et aux autres objets durs, ainsi qu'aux cycles thermiques (variation des températures entre la nuit et le jour). Avant de passer au laminage, une feuille d'EVA est insérée entre le verre et la matrice de cellules photovoltaïques.

Laminage

Le processus de laminage, consiste à chauffer les modules, sans le cadre, à la température de 100 à 142 °C, afin de permettre aux différentes couches (EVA Tedlar) de fondre autour des cellules photovoltaïques et d'adhérer au verre de protection, constituant ainsi un seul corps sous vide.

Coupe et pose de boîte

A la sortie du lamineur, les modules sont prêts à produire de l'électricité, mais non propres à la vente. En effet, quand l'EVA et le Tedlar sont laminés, il y a de la matière en trop et donc il faut couper l'excédent. Ensuite, on prend une boîte pour le raccordement électrique, qu'on colle sur la partie arrière du panneau.

Encadrement

Pour protéger le module des chocs, un cadre aluminium est posé par une machine spéciale qui presse le cadre contre le panneau.

Test et stockage

Après l'encadrement, le module passe au dernier test de puissance électrique, en utilisant un simulateur solaire, sous forme de flash qui produit les conditions d'éclairement standard. Le banc de mesures détermine ainsi sa puissance maximale effective, puis le module sera stocké [33].

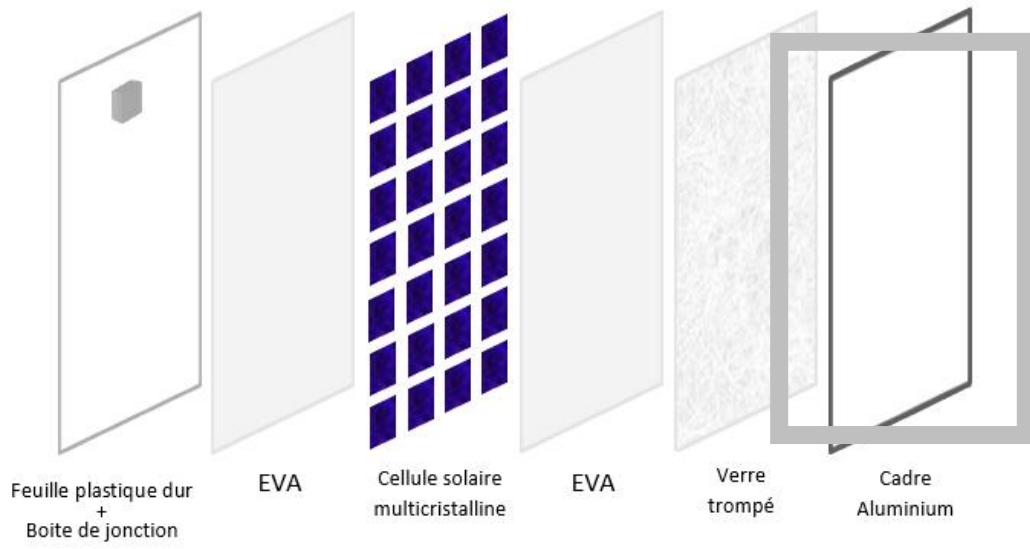


Figure (I. 15) : Schéma réalisée sur la composition d'un panneau solaire.

Chapitre II : La diffusion du Bore dans le Silicium

II.I. Introduction

Le dopage dans les semi-conducteurs est possible grâce à l'introduction d'atomes (impuretés) dans le cristal, possédant une valence différente de celle des éléments composant le semi-conducteur. Le dopage permet alors de contrôler la concentration de charges et donc la conductivité du semi-conducteur. Cette étape très importante dans la fabrication des cellules photovoltaïques utilise principalement deux procédés de dopage : implantation ionique et la diffusion thermique.

Dans ce chapitre, nous verrons tout d'abord quelques généralités sur le Silicium, puis nous détaillerons les principales équations régissant la théorie de diffusion et nous présenterons les différents mécanismes. Nous traiterons l'importance des paramètres physiques et technologiques pouvant influencer la diffusion dans le Silicium. Un état de l'art des procédés de diffusions existants pour le dopage Bore sera présenté. Enfin, nous citerons les contraintes liées au développement de cette technologie pour la réalisation des émetteurs Bore.

II.II. Le Silicium

II.II.1. Structure cristallographique

La structure cristallographique du Silicium est celle du cubique diamant, avec un paramètre de maille de $a = 5,431 \text{ \AA}$ à température ambiante [34]. La densité atomique est de $5 \times 10^{22} \text{ at/cm}^3$ et la distance interatomique est de $2,35 \text{ \AA}$. La structure du Silicium est représentée dans la Figure (II.1).

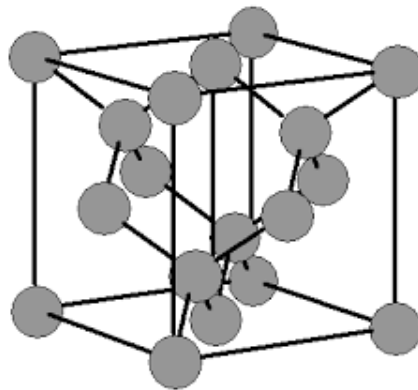


Figure (II. 1) : Structure cristalline du Silicium (Si) [35].

II.III. Les principales technologies de cellules photovoltaïques de type n

Les différentes structures de cellules solaires en Silicium de type n étudiées par les scientifiques se distinguent généralement par la formation de l'émetteur :

- Les émetteurs aluminium en face arrière ;
- Les structures à hétérojonction à base de Silicium amorphe p-i-n ;

- Les émetteurs réalisés par diffusion du Bore.

II.IV. Notions théoriques de la diffusion thermique dans le Silicium

La formation des jonctions n+ et p+ est obtenue par dopage. Le semi-conducteur peut être dopé en introduisant des atomes (impuretés) dans le cristal, possédant une valence différente de celle des éléments composant le semi-conducteur. Le dopage permet alors de contrôler la concentration de charges et donc la conductivité du semi-conducteur

Il existe différentes techniques pour introduire des impuretés pour le dopage des matériaux semi-conducteurs dont nous pouvons retenir : dopage par diffusion, dopage par implantation ionique, dopage par transmutation nucléaire, dopage par technique laser [36, 37].

Dans le cadre de notre étude, nous étudions une simulation de diffusion thermique qui est moins cher par rapport à l'implantation ionique ou aux autres techniques de dopage.

II.IV.1. Historique de la diffusion

La loi empirique de la diffusion était connue depuis longtemps. C'est en 1855 qu'Adolf FICK physiologiste allemand, réalise une série d'expérience sur les bases théoriques des phénomènes de diffusion, ils expriment le flux d'atomes dans une direction donnée dans un cristal de la même manière que le flux de chaleur ou la densité de courant. **La première loi** de la diffusion, qui relie le transport d'une espèce au gradient de sa concentration dans un fluide. De la première loi, il a déduit **la seconde loi**, elle exprime le bilan des entrées-sortie dans un petit volume [38, 39].

II.IV.2. Principe de la diffusion

Quel que soit la source de Bore utilisée pour le dopage, la diffusion à l'intérieur du substrat se fait par l'intermédiaire de la couche en verre de Borosilicate (BSG). Cette dernière est pré-déposée selon différentes techniques, et par des sources de Bore distinctes. On cite dans les prochaines lignes, les principales sources de Bore destinées à la formation du BSF.

- **Source liquide** : Le Tribromure de Bore (BBr_3) et le Trichlorure de Bore (BCl_3) sont les plus utilisés, ou même le Trimethylborate (TMB) qui est une source organique non toxique. Ces liquides sont facilement vaporisés dans un bulleur (Ang :Bubbler). Un second gaz porteur passe à travers ce dernier et vient se charger en vapeur de la source dopante, puis sera diffusée à l'intérieur du tube [40, 41, 42].
- **Source gazeuse** : Le bulleur n'est pas utilisé dans ce cas. Les dopants gazeux sont introduits directement dans le tube ou bien dilués en amont de l'injecteur par un autre gaz porteur tel que l'azote. Le Diborane (B_2H_6) est une bonne source gazeuse pour la

formation du BSG, mais il représente l'inconvénient d'être toxique et réagit d'une manière explosive avec l'air [43].

- **Source solide** : Souvent sous forme de plaquettes ou disques, les sources solides sont disposées entre les plaques adjacentes de Silicium ou juste à côté. L'azote et l'oxygène sont utilisés comme gaz porteurs, leurs débits à l'intérieure du tube sont contrôlés. Le principale avantage de telles sources est que chaque plaquette en Silicium aye sa propre source, donc il y'a relativement peu de variation dans les valeurs de la résistance carrée. Parmi les sources solides, on distingue [41, 43] :

* Le nitrure de Bore (BN) : Cette source nécessite une pré-activation sous ambiance gazeuse oxygénée (25%) pour former une couche de surface riche en Oxyde de Bore (B₂O₃) [44].

* SiO₂ dopé en Bore : Ce sont des plaquettes en céramique ou en Silicium, dopées sur leurs deux faces par la silice (SiO₂). Le dopage est réalisé par un mélange gazeux ayant une fraction contrôlée de B₂H₆/SiH₄ et déposé par APCVD [43].

Les techniques de dopage par source solide exigent l'utilisation de l'espace à l'intérieur du tube ce qui réduit le nombre de wafers pouvant être dopés simultanément. Elles nécessitent aussi une étape supplémentaire d'activation, qui est largement responsable à la réduction de la durée de vie des porteurs de charge [43]. Un autre enjeu avec les sources de BN est la perte graduelle en Bore à fur et à mesure de son utilisation. Cela signifie que la résistance des wafers doit être soigneusement surveillée pour déterminer quand les sources doivent être remplacées [43].



Figure (II. 2) : Four Tempress de CRSTE.

II.IV.3. Description chimique des étapes de réalisation d'un dopage type P

La diffusion du Bore dans le Silicium exige généralement des températures compris entre 850 et 1150°C, selon la source du Bore utilisée.

En première phase, la diffusion consiste en un dépôt primaire d'Oxyde de Bore (B₂O₃) sur la surface de la plaquette, obtenu entre 850 et 950°C selon la réaction suivante [43, 45, 46] :



Ultérieurement, l'Oxyde borique et le Silicium réagissent en donnant naissance aux atomes de Bore et des molécules du DiOxyde de Silicium :



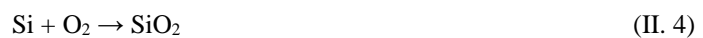
En réagissant entre eux, le DiOxyde de Silicium et l'Oxyde borique forment une couche appelée verre de borosilicate (BoroSilicateGlass) déposée en surface de la plaquette :



(B-Si-G) (verre de borosilicate)

Cette couche devient la source fondamentale de dopage en deuxième phase de pénétration du Bore en volume du substrat, ou précédemment appelée « redistribution ». Pour avoir une jonction efficace, cette étape nécessite des températures supérieures à 900°C en raison du faible coefficient de diffusion du Bore.

Mais la série de réactions ne s'arrête pas là. L'interface devient oxydée par une réaction entre le Silicium et l'Oxygène, ce qui se traduit en une diminution de la quantité de Bore dopé à fur et à mesure que la concentration en oxygène augmente [45] :



D'autre part, si la source de diffusion est assez importante tout au long du processus, de manière à saturer la surface de la plaquette en atomes dopantes, une couche riche en Bore se constitue (Boron Rich Layer). Cette dernière ait la formule Si-B_x (tel que : 4 ≤ x ≤ 6), et peut agir comme une source de diffusion supplémentaire de Bore, mais elle n'est pas uniforme ce qui induit une inhomogénéité dans la couche diffusée :



Composé SiB_x (couche riche en Borre (BRL))

De plus, Kesler et al [39], démontrent qu'une épaisseur de la couche BRL supérieure à 10nm fait dégrader la durée de vie des porteurs de charges en dessous de 1000 μs.

Finalement, la couche du verre de borosilicate et la couche riche en Bore devraient être enlevé. Un bain d'Acide Fluorhydrique est suffisant pour la suppression de la couche BSG. Pour la partie BRL, il est premièrement important de tester son existence, ceci est due au fait que la BRL est hydrophile, alors que le BSG est hydrophobe. Le composé Si-B est insoluble dans l'HF contrairement au BSG, son l'enlèvement devient difficile. Heureusement, Le BRL peut réagir avec l'oxygène en formant de nouveau un BSG, qui est soluble dans l'HF [45] :

L'étape de l'enlèvement du BRL fait le sujet de nombreuses recherches ayant le but de diminuer sa constitution durant la phase de diffusion, ou même son élimination en modérant l'ambiance gazeuse et le flux d'oxygène.

Les caractéristiques de la couche ainsi diffusée, c'est-à-dire ; la concentration de dopants en surface et en volume, la profondeur de la jonction, l'uniformité du dopage, seront dépendantes de différentes conditions de diffusion. La durée de diffusion et la température sont des paramètres non négligeables alors, soient même indispensables à prendre en compte pour l'optimisation de n'importe quelle jonction.

Dans notre cas, On s'intéresse à la formation d'un émetteur à base de Bore, sur un substrat de Silicium type n. On parle bien alors de la création d'une jonction np+.

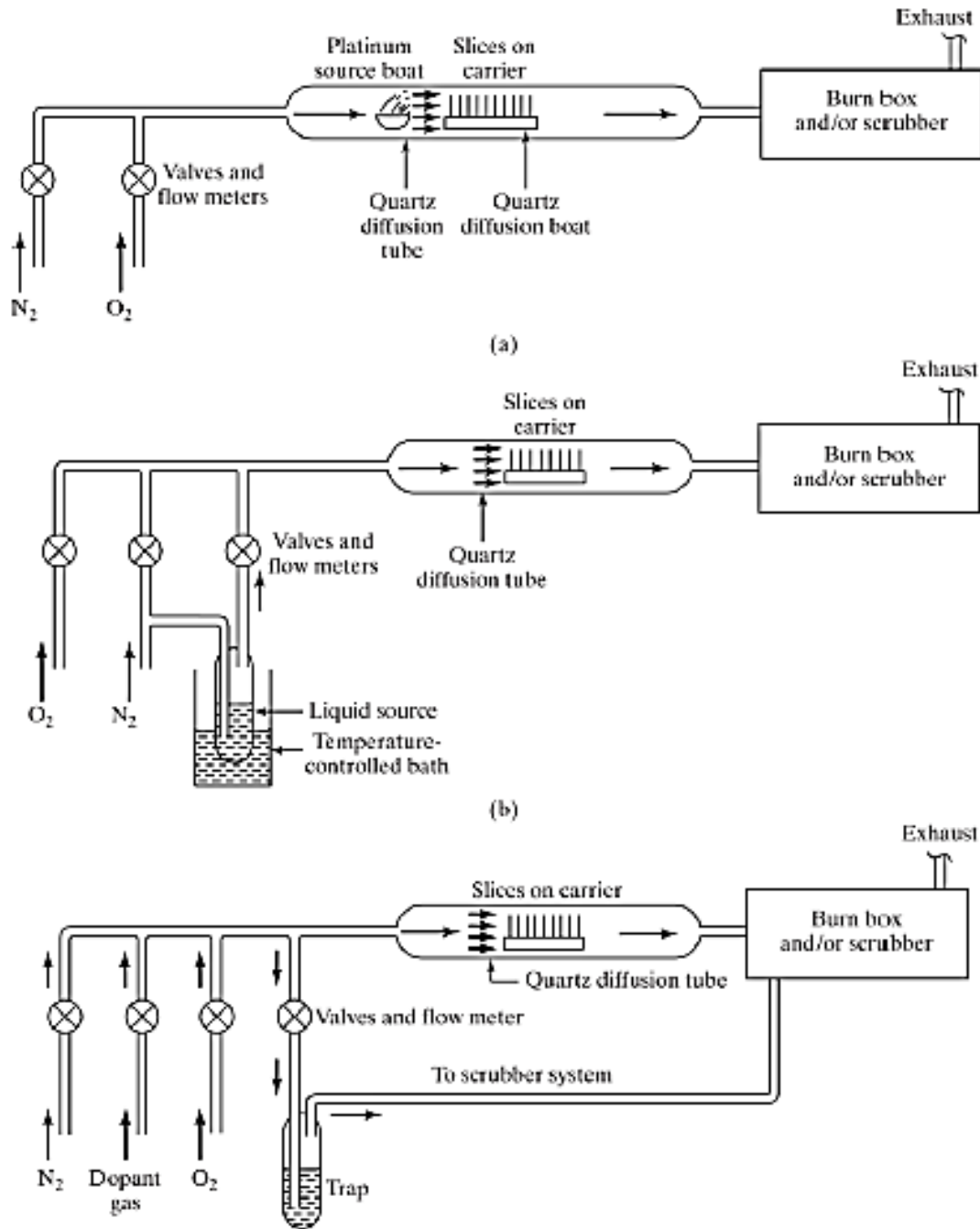


Figure (II. 3) : Les procédés de diffusion : a) source solide, b) source liquide, c) source gazeuse [44].

Le dopage thermique se fait par deux étapes :

- **Pré-dépos** : les dopants sont déposés à la surface du substrat à partir d'une source extérieure (solide, liquide ou gazeuse). Dans cette étape, il y aura une concentration d'atomes qui pénètre dans le matériau à une profondeur de quelques $1/10$ de μm
- **Redistribution** : la source extérieure est supprimée et la température augmentée. Ainsi, les dopants déposés auparavant à la surface pénètrent par diffusion pour occuper leur position à l'intérieur du substrat. Cette étape s'appelle diffusion à partir

d'une couche infiniment mince 'source limitée' ; car, c'est la quantité 'limitée' déposée à la surface qui va diffuser.

II.IV.4. Mécanisme de diffusion à l'échelle atomique

On peut comprendre le phénomène de diffusion des impuretés lorsqu'on observe le comportement de celles-ci à l'échelle microscopique. L'association d'un atome dopant avec un défaut forme une paire mobile qui se propage dans le cristal suivant deux mécanismes de diffusion, de type lacunaire ou interstitiel.

II.IV.4.1. Mécanisme lacunaire

La diffusion via des lacunes s'effectue lorsqu'une lacune arrive au voisinage de l'impureté, cette dernière peut prendre alors la place de la lacune, c'est-à-dire l'occupation d'une lacune ou laissée par un atome du réseau cristallin qui peut, lui aussi se mouvoir en laissant des lacunes (figure I.4) [44].

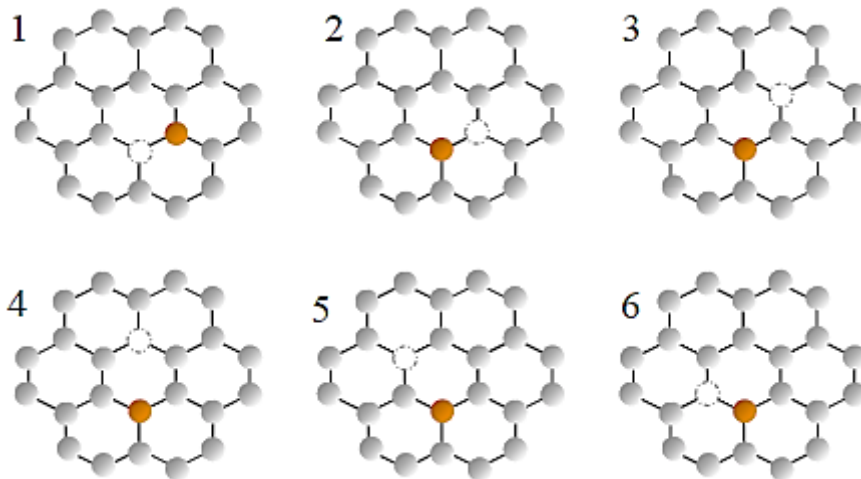


Figure (II. 4) : Schéma de principe de la migration du dopant selon le mécanisme lacunaire [44].

II.IV.4.2. Mécanisme interstitiel

Dans le cas d'un mécanisme interstitiel, l'impureté diffuse de site interstitiel en site interstitiel (figure II.5) c'est à dire un déplacement des atomes entre les sites cristallins. C'est un mécanisme de diffusion rapide. L'impureté peut donc parcourir de grandes distances [44].

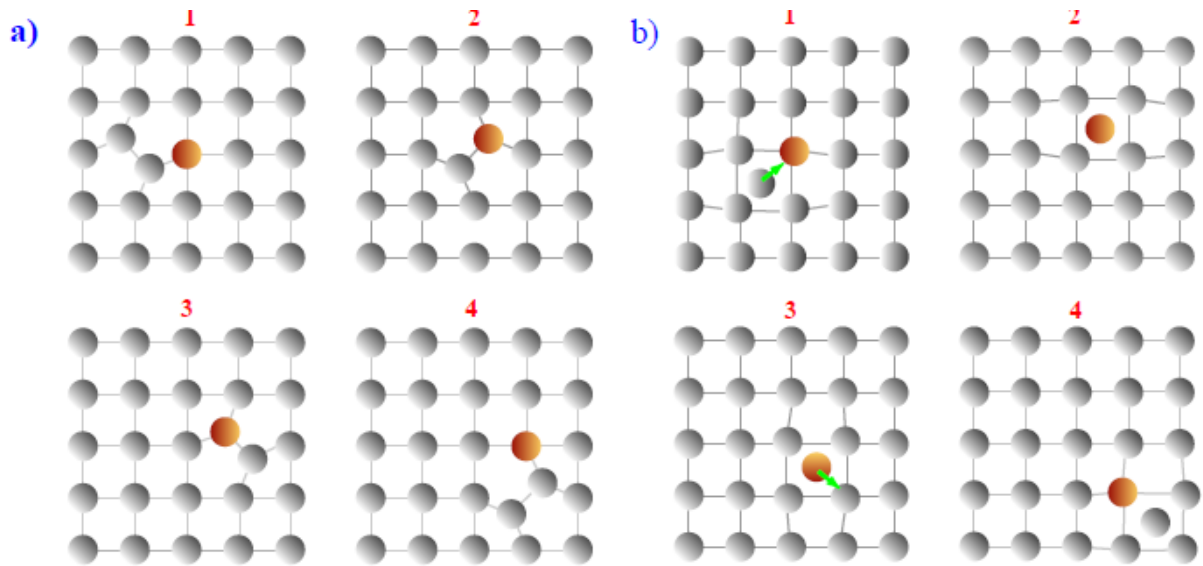


Figure (II. 5) : Schéma de principe de migration du dopant via les mécanismes interstitiels : a) migration par paire ; b) mécanisme de kick-out [45].

II.IV.5. Equations de diffusion

La compréhension des phénomènes de diffusion des dopants passe par le rappel des équations générales de FICK mais surtout par une bonne connaissance des défauts ponctuels du Silicium. Les lois de FICK décrivent la diffusion de la matière dans un milieu binaire. Elles ont été établies par Adolf FICK1 en 1855 [46].

L'équation de diffusion est une équation aux dérivées partielles. En physique, elle décrit le comportement du déplacement collectif de particules (molécules, atomes, photons, neutrons, etc.)

II.IV.5.1. Première loi de FICK

Dans la première loi de FICK, il est considéré que l'impureté est seulement soumise au gradient de concentration dans le matériau. Cependant, il peut exister d'autres forces motrices (champ de contraintes, champ électrique...) pouvant entraîner le transport des impuretés. L'impureté acquiert alors une vitesse stationnaire de déplacement dans le matériau. Un deuxième terme est donc ajouté à la première loi de FICK dans le cas d'un matériau isotrope [47,48].

$$\Phi = -D \frac{\partial N}{\partial x} \quad (\text{II. 6})$$

Où,

Φ : est le flux de particules, c'est-à-dire, le débit d'atomes d'additifs par unité de surface et par seconde.

D : est le coefficient de diffusion (qui s'exprime en cm^2/s).

N : est la concentration d'additifs (ou nombre d'atomes par unité de volume).

Le signe (-) indique que les particules se dirigent dans le sens des concentrations décroissantes (Figure II.6) [47, 48].

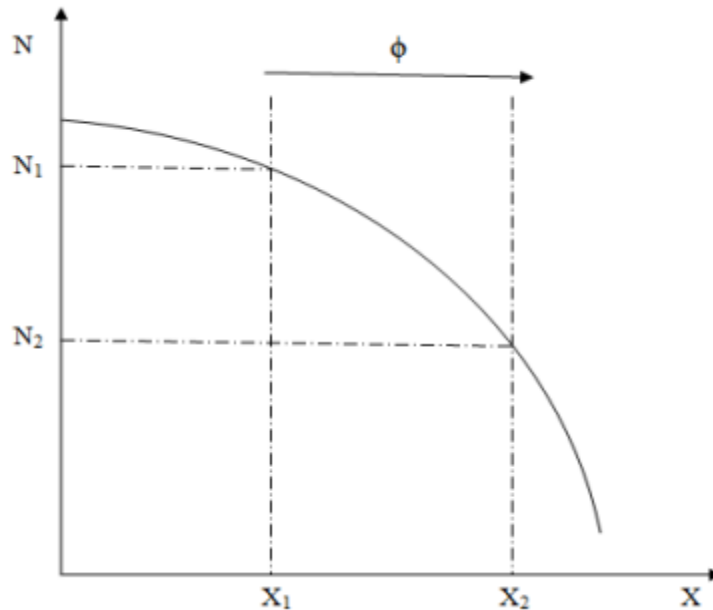


Figure (II. 6) : Variation de la concentration d'atomes additifs en fonction de la profondeur du semi-conducteur..

II.IV.5.2. Deuxième loi de FICK

Cette loi permet de décrire l'évolution temporelle de la concentration en impuretés dans le matériau. Si l'on suppose que le système est conservatif, c'est-à-dire qu'il n'y a ni perte ni formation d'atomes de l'impureté diffusante [49] :

Lors de la traversée par des particules d'une couche mince d'épaisseur dx , la variation du flux entre les deux surfaces limitant la couche est égale à la variation de la concentration dans la couche pendant le temps de traversée (Figure II.3).

Soit :

$$\frac{\partial N}{\partial t} = - \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (\text{II. 7})$$

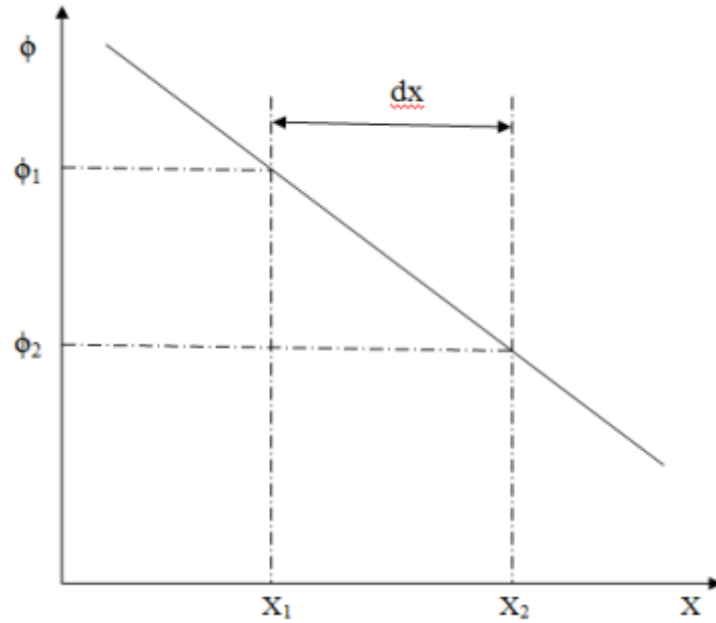


Figure (II. 7) : Variation du flux d'atomes d'additifs en fonction de la profondeur du semi-conducteur.

En remplaçant Φ par son expression de la première loi de FICK et en supposant D indépendant de x , l'équation de la seconde loi de FICK [50], peut s'écrire sous la forme :

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N}{\partial x^2} \quad (\text{II. 8})$$

Dans la pratique, tout problème de diffusion est défini par les conditions initiales et les conditions aux limites.

A l'instant $t=0$, la concentration a une certaine forme, ce qui nous donne les conditions initiales. De plus, on connaît la géométrie des échantillons, ce qui nous donne les conditions aux limites

La résolution de la deuxième équation de FICK (II.3) nous donne la distribution de la concentration en fonction de x et de t (c'est-à-dire la solution du problème de diffusion).

Deux cas peuvent se présenter, la diffusion peut se faire, soit à partir d'une concentration constante ou à partir d'une concentration infiniment mince [50].

Dans notre étude nous sommes intéressés à une diffusion à partir d'une concentration constante (Concentration initiale).

Dans le cas d'une diffusion à partir d'une concentration constante, les conditions initiales et aux limites sont les suivantes :

Condition initiale :

$$t = 0 : \begin{cases} N = N_0, & \text{Si } x \leq 0 \\ \text{et} \\ N = 0 & \text{Si } x > 0 \end{cases} \quad (\text{II. 9})$$

Conditions aux limites :

$$x \rightarrow -\infty : \begin{cases} N = N_0 \\ \frac{\partial N}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad \text{Pas de variation à } -\infty \text{ car } N = N_0 \quad (\text{II. 10})$$

$$x \rightarrow +\infty : \begin{cases} N = 0 \\ \frac{\partial N}{\partial x} = 0 \end{cases} \quad \text{Pas de variation à } +\infty \text{ car } N = 0 \quad (\text{II. 11})$$

La résolution de la deuxième équation de FICK dans les conditions initiales et aux limites conduit à la fonction suivante [50] :

$$N(x, t) = \frac{N_0}{2} \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \exp(-y^2) dy \right) \quad (\text{II. 12})$$

Y : variables d'intégration.

D : coefficient de diffusion.

L'intégrale est connue sous le nom de : fonction d'erreur, ou ERFC.

$$\text{erfc}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u \exp(-y^2) dy \quad (\text{II. 13})$$

$$\text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}} \exp(-y^2) dy \quad (\text{II. 14})$$

Par suite l'expression de N(x,t) peut s'écrire sous la forme :

$$N(x, t) = \frac{N_0}{2} \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \quad (\text{II. 15})$$

On peut donc écrire :

$$N(0, t) = \frac{N_0}{2} = N_s \quad (\text{II. 16})$$

Ou N_s est la concentration à l'origine.

Cette concentration N_s ne peut en aucun cas dépasser la solubilité limite.

Nous pourrions donc avoir :

$$N(x, t) = N_s \cdot \left(1 - \text{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right) \quad (\text{II. 17})$$

On note :

$$\operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D.t}} = \operatorname{erfc} \frac{z-z_p}{z_f\sqrt{2}} \quad (\text{II. 18})$$

On peut donc en conclure que la diffusion à partir d'une concentration constante conduit à une répartition selon la fonction d'erreur complémentaire

La solubilité limite du diffusant à la température T c'est la concentration d'additifs au-dessus de laquelle tous les atomes additifs se regroupent en amas d'atomes électriquement inactifs.

- La répartition des additifs est définie entièrement par trois paramètres :
- La concentration constante des additifs ;
- Le coefficient de diffusion D ;
- La durée de diffusion t.

Ainsi que le pic de concentration Z_p .

II.IV.6. Coefficient de diffusion

La diffusion des dopants dans le Silicium peut se faire sous différentes conditions. Le profil final de dopant ayant été diffusé dans le Silicium est fortement conditionné par les paramètres technologiques liés à la surface (comme nous avons mentionnées dans la partie précédente).

La figure II.8 les variations expérimentales du coefficient. On constate qu'ils sont très différents selon l'impureté de diffusion avec la température décrite par une loi d'Arrhenius [51, 52].

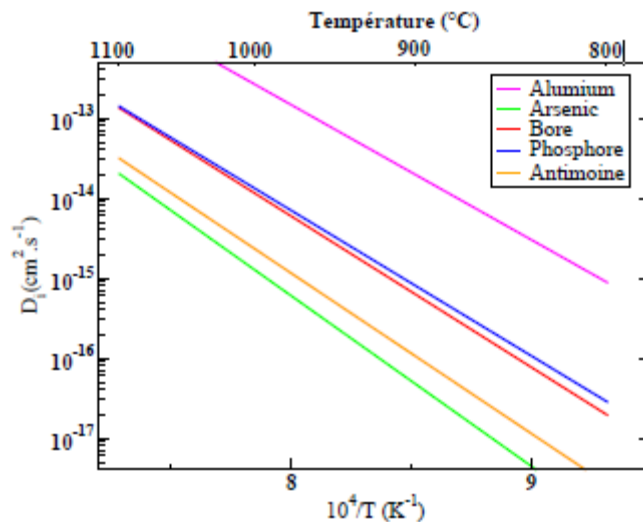


Figure (II. 8) : Variation du coefficient de diffusion intrinsèque du Silicium en fonction de la température pour différentes impuretés [51].

$$D = D_0 \exp\left(\frac{QA}{k_B T}\right) \quad (\text{II. 19})$$

$$D = 7,87 \exp\left(-\frac{3,75}{k_B T}\right) \quad (\text{II. 20})$$

Où D_0 est considéré comme une constante et est appelé le facteur de fréquence, avec Q_a énergie d'activation du Bore.

II.V. Phénomènes de génération et de recombinaison

La durée de vie des porteurs de charge dans un semiconducteur est souvent limitée par la présence de défauts de réseau du matériau (lacunes, interstitiels, impuretés étrangères...). Ces défauts, qui jouent le rôle de pièges pour les porteurs libres, introduisent des niveaux d'énergie discrets dans la bande interdite. Dans les jonctions PN, le phénomène de génération recombinaison, à partir des pièges situés dans la zone de charge d'espace [53].

Ce mécanisme de recombinaison a été proposé et analysé par Hall, Shockley et Read. Ces auteurs ont considéré des défauts, appelés centres de recombinaison, qui sont caractérisés par des états localisés sur un niveau d'énergie défini de la bande interdite [54].

II.V.1. La recombinaison

II.V.1.1. Recombinaison radiative

Le processus de la recombinaison radiative ou interbandes est défini comme l'inverse du processus de la photo-génération. Elle implique la recombinaison d'un électron de la bande de conduction avec un trou de la bande de valence et donne alors naissance à une radiation sous forme de photon. Ce processus est faible pour les matériaux à gaps indirects comme le Silicium. De ce fait, ce mécanisme n'influe pas considérablement sur la durée de vie des porteurs minoritaires [55].

II.V.1.2. Recombinaison Auger

Ce type de recombinaison est décrit comme un mécanisme à trois entités. En effet, l'excès d'énergie issu de la recombinaison d'un électron de la bande de valence peut être transféré à une troisième particule libre, électron ou trou. Ces charges sont considérées comme quasi-libres et n'interagissent pas entre elles. La recombinaison Auger prédomine aux forts niveaux de dopage ($N > 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) et elle réduit rapidement la durée de vie.

Le mécanisme de recombinaison Auger est proportionnel au carré du dopage et il intervient surtout dans les zones fortement dopées de la cellule photovoltaïque comme l'émetteur (n^+) ou la zone de champ de surface arrière (p^+). Ainsi les recombinaisons Auger assistées par des niveaux peu profonds causées par l'augmentation des donneurs dans le Silicium qui a la propriété d'augmenter la solubilité des lacunes, introduisant des niveaux d'énergies proches de la bande de conduction [56].

II.V.1.3. Recombinaison bande à bande

La recombinaison directe est quand un électron dans la bande de conduction se combine avec un trou dans la bande de valence, sans variation d'énergie cinétique de l'électron. Ce type de recombinaison se produit dans les matériaux directs tels que le GaAs (Gallium Arsenide). Étant donné qu'aucune quantité de mouvement n'est nécessaire, le taux de recombinaison est le plus élevé. La durée de vie d'un porteur est l'inverse de son taux de recombinaison, par conséquent, cette durée de vie est très courte [57].

II.V.1.4. Recombinaison Schokley Read Hall

Les recombinaisons SRH sont liées à la présence d'impuretés ou de défauts (dislocations, lacunes...) au sein de la structure cristalline du Silicium. Cela induit la présence de niveaux d'énergie discrets au sein de la bande interdite du matériau. Ces niveaux, appelés pièges, facilitent la recombinaison des porteurs par un mécanisme en deux étapes. Un électron de la bande de conduction va d'abord se relaxer sur un niveau d'énergie intermédiaire lié à un défaut. Ensuite, une deuxième relaxation va lui permettre de se recombiner avec un trou de la bande de valence [58, 59].

II.V.1.5. Recombinaison de surface

La surface représente une forte discontinuité de la structure cristalline du Silicium. L'interruption brutale de la périodicité du cristal entraîne de nombreux défauts structuraux, introduisant dans le gap du Silicium des niveaux énergétiques où vont avoir lieu les phénomènes de recombinaison. Ces défauts sont principalement des liaisons pendantes, c'est-à-dire des atomes de Silicium auxquels il manque une liaison covalente et qui ne sont donc pas dans une configuration électronique stable. On peut dire dans ce cas que les recombinaisons sont formulées par unité de surface et non pas par unité de volume. D'autre part, on peut considérer que ces défauts, du fait de leur grand nombre, sont distribués d'une façon continue dans tout l'intervalle d'énergie du gap. Il existe deux manières pour réduire les recombinaisons à la surface du semiconducteur [60] :

- La première consiste à réduire la portée des états de surface en minimisant la densité d'état d'interface dit ainsi que l'amplitude des sections de capture efficaces.
- La deuxième consiste à une passivation par effet de champ afin de réduire la concentration de porteurs minoritaires en surface.

En pratique, pour le Silicium cristallin, on a recours à des dépôts d'un Oxyde SiO_2 ou des surfaces de nitrures de Silicium SiN_x .

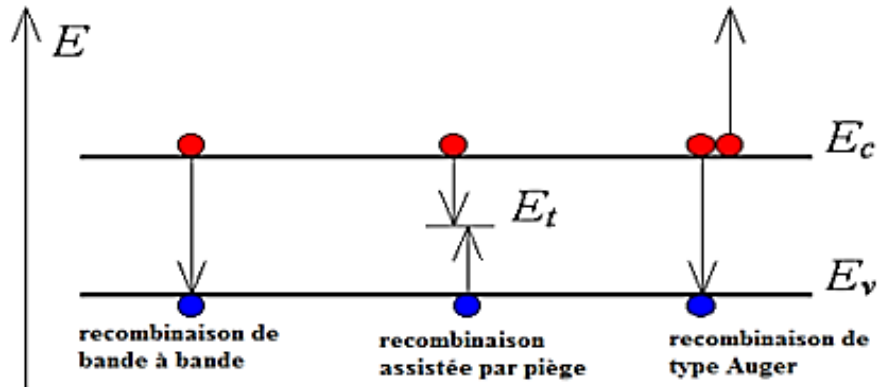


Figure (II. 9) : Type de recombinaison [57].

II.V.2. Génération

La génération peut être considérée comme le mécanisme inverse de la recombinaison. La génération des porteurs est un processus pour reconstituer l'équilibre d'un semi-conducteur qui a été perturbé. La génération se produit quand il y a un déficit de la concentration en porteur comparée à la concentration d'équilibre.

Des porteurs doivent être créés dans le semi-conducteur pour atteindre cet équilibre. Lorsqu'on expose l'une des faces de la cellule solaire sous un flux solaire, on constate immédiatement un phénomène intéressant au niveau de cette structure, la radiation lumineuse peut ainsi atteindre le cristal semi-conducteur, et en particulier la jonction. Cette radiation est capable de générer une paire électron-trou [61].

II.VI. Les pertes d'une cellule solaire en Silicium

On peut classer les pertes au niveau des cellules solaires en deux grandes parties : des pertes physiques et des pertes technologiques. Les pertes physiques sont généralement liées aux propriétés des matériaux utilisés, pour les limitations technologiques, elles sont induites par le processus de fabrication. Des choix technologiques appropriés peuvent cependant avoir des conséquences sur les limitations intrinsèques du matériau [62].

II.VI.1. Les pertes physiques

Une cellule solaire est soumise à trois principaux types de pertes physiques [62, 63] :

- Les premières pertes se produisent quand les photons pénètrent dans la cellule, certains n'arrivent pas à communiquer leur énergie aux électrons.
- Deuxième type de pertes : certains électrons n'ont pas assez d'énergie pour parvenir au circuit extérieur, ils dissipent alors cette énergie sous forme de chaleur, par un phénomène dit de « recombinaison ».

- Troisième type de pertes, les pertes résistives : le courant électrique qui circule dans le semi-conducteur se transforme inévitablement, pour partie, en énergie thermique, à cause de la résistance électrique du matériau (ce phénomène est aussi connu sous le nom de pertes par effet Joule). Plus l'intensité lumineuse envoyée vers la cellule est élevée, plus ces pertes résistives augmentent. À des intensités lumineuses trop fortes, elles deviennent même tellement importantes qu'elles entraînent la diminution du rendement de la cellule.

II.VI.2. Les pertes technologiques

Parmi les pertes technologiques les plus importantes, on trouve :

- Les pertes par réflectivité, avant l'entrée de la lumière dans la cellule, une quantité de photons sont réfléchis par la surface avant de la cellule. Le coefficient de réflexion est voisin de 40% pour le Silicium monocristallin poli optique. Une texturisation et une couche antireflet permettent de réduire ce coefficient en dessous de 5 % [64].
- Les pertes par ombrage, le dépôt des contacts métalliques nécessaires pour collecter les charges photo générés entraîne une zone d'ombrage sur la surface exposée de la cellule en face avant.
- Les pertes des IR, à cause de la limite de l'épaisseur de la cellule, un certain nombre de photons (photons infrarouges) travers la cellule sans être absorber.
- Durée de vie et rendement de collecte, Le rendement de collecte correspond au rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés et le nombre total de charges photo générées. Ce terme prend en compte les recombinaisons électrons-trous en volume et en surface de la cellule. Il dépend directement de la durée de vie des porteurs minoritaires (temps moyen entre la génération et la recombinaison d'un porteur et donc de leur longueur de diffusion L).

Les facteurs de pertes sont donc liés d'une part à des limitations propres au matériau et d'autre part à la technologie d'élaboration de la cellule. Si sur ces derniers que se portent la majorité des optimisations des cellules photovoltaïques [65].

II.VII. Technologie pour minimiser les pertes

Passivation des faces avant et arrière et en volume : La passivation en surface et en volume, consiste à améliorer la qualité électronique en surface et en volume en neutralisant les sites actifs, sources de recombinaisons.

Couche anti reflet : La couche antireflet et un réflecteur arrière bien optimisé combiné à une bonne texturisation sur les surfaces avant et arrière de la cellule respectivement, permettent de réduire les pertes par réflexion. L'objectif étant de minimiser le coefficient de réflexion sur la face avant de la cellule en créant des interférences destructives et augmenter le

coefficient de réflexion sur la face arrière de la cellule en créant des interférences constructives.

Texturation de la surface : La texturation de la surface, qui 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. Le relief créé permet d'augmenter la surface et induit des réflexions multiples sur les facettes des pyramides. La texturation assure ainsi le piégeage d'un maximum de lumière réduisant les pertes liées à la réflectivité. Différents procédés sont utilisés pour réaliser la texturation : attaques chimiques de la surface (KOH, NaOH, acides), texturation mécanique, plasma ou laser. Ces méthodes peuvent faire passer la réflectivité effective de 40 % à moins de 10 %.

Le fort dopage de l'émetteur : Le fort dopage de l'émetteur, permet de limiter la résistance du contact métal/semiconducteur (créé par la connexion entre les contacts métalliques et l'émetteur) et de créer un champ électrique suffisant au niveau de la ZCE.

BSF (Back Surface Field) : Son rôle est de créer un champ électrique regardant en face arrière, qui permet d'abaisser la valeur effective de la vitesse de recombinaison et par conséquent d'améliorer les caractéristiques électriques de la cellule [66].

II.VII. L'intérêt du Silicium de types N

Les cellules solaires au Silicium, largement utilisées dans les expériences spatiales pour la conversion en électricité de l'énergie solaire. Les recherches sur les cellules solaires ont démarré dans les années 1950 avec les premières jonctions P-N ayant un rendement de 5 %. L'activité dans ce domaine s'est fortement développée à partir des années 1970, suite au premier choc pétrolier [67, 68] En 2006, 93 % des cellules solaires ont été faites avec des plaquettes de Silicium (32 % avec des monocristaux, 57 % avec des multicristaux et 4 % avec des rubans). La base, le plus souvent de type p, est dopée au Bore, l'émetteur est obtenu par une diffusion de Phosphore limitée à 0,2 - 0,3 μm de profondeur. L'épaisseur des plaquettes de Silicium est de 200 à 300 μm . La face avant (éclairée) reçoit une couche mince anti reflet qui était en TiO_2 , mais qui est remplacée aujourd'hui par du nitrure de Silicium Hydrogéné (SiN-H) [68]. La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire à terre est aujourd'hui une réalité industrielle dont la croissance est spectaculaire. Dans les dix années à venir, il semble que le Silicium cristallin « massif » soit de très loin le matériau dominant, alliant abondance, innocuité, stabilité et coût relativement modeste, qui s'allie à une excellente maîtrise des procédés technologiques reposant sur l'industrie de la microélectronique [68].

L'amélioration récente des techniques de solidification directionnelle a conduit à une augmentation significative de l'efficacité des cellules solaires à base de Silicium cristallin. Jusqu'à présent, le Silicium à haute performance fabriqué industriellement est exclusivement du type p. Cependant, il a été démontré qu'en changeant le type de dopage du substrat de type p au type n, il peut être une catégorie de matériau prometteuse pour la production de cellules solaires à haut rendement et à faible coût. Schindler et al ont démontré le potentiel d'efficacité élevée (du High Performance Multi crystalline Silicon) de type n tant sur le matériau que sur le niveau des cellules solaires, avec la meilleure cellule présentant une efficacité de 19,3%.

Le Silicium de type p était plus stable dans l'espace que le Silicium de type n et que la longueur de diffusion des porteurs minoritaires du Silicium de type p était perçue comme étant plus longue que celle du Silicium de type n. Cette propriété exprimant un meilleur courant de court-circuit car la longueur de diffusion des porteurs est liée à cette grandeur. Pour ces raisons, les cellules en Silicium de type p furent privilégiées pour la majorité des applications terrestres jusqu'à ces dernières années, où l'avantage de l'utilisation du Silicium de type n est apparu. Selon une étude réalisée par ITRPV (International Technology Roadmap for Photovoltaic) en octobre 2016, il est prédit que le Silicium type n dominera le marché industriel photovoltaïque après 2020 [69].

L'un des problèmes les plus connus du Silicium cristallin de type p est qu'il souffre de la dégradation due à la lumière induite. Celle-ci est attribuée aux complexes Bore oxygène présents dans les substrats de Silicium. Il a été prouvé par de nombreux chercheurs que le Silicium monocristallin (Cz-Si) de type n n'est plus stable du fait que sa contenance en oxygène est plus faible que celle dans le type p.

Le Silicium de type n présente des avantages :

Sa plus grande tolérance vis-à-vis de nombreuses impuretés métalliques comme le fer interstitiel en raison de leurs sections de capture inférieures pour les porteurs minoritaires et l'absence de dégradation liée au Bore et à l'oxygène [69].

- D'autre part, la mobilité des électrons minoritaires dans le Silicium de type p est supérieure à la mobilité des trous minoritaires dans le Silicium de type n d'un facteur ~ 2 à 3 (selon la résistivité du substrat).
- Ainsi, afin d'obtenir des longueurs de diffusion de porteurs minoritaires similaires dans les deux matériaux, la durée de vie du porteur excédentaire dans le Silicium de type n doit excéder la durée de vie du porteur en excès dans le Silicium de type p, par ce facteur pour compenser la mobilité des porteurs minoritaires.

- Le Silicium multicristallin de type n, peut être très stable avec des durées de vie de porteurs minoritaires très élevées.
- Ils ont démontré aussi que la section de capture des électrons plus large que celle des trous pour la majeure partie des impuretés métalliques du Silicium. Cela signifie que le Silicium de type n est mieux immunisé contre les effets de la contamination métallique que le Silicium de type p, à degré similaire de concentration d'impuretés. Cette étude confirme aussi que pour le Silicium de type p, le taux d'injection de porteurs dépend de la section de capture des électrons alors que cela n'est pas le cas pour le Silicium de type n.
- Un modèle de recombinaison SRH a été réalisé dans cette étude sur des échantillons Fz-Si de type p et de type n contenant des impuretés de fer implantées. Cette étude confirme que la différence de section de capture des électrons et des trous conduit à la dépendance du taux d'injection des courbes de durée de vie pour le Silicium de type p, alors que cela n'est pas le cas pour le Silicium de type n.
- Il est conclu que plusieurs autres paramètres peuvent affecter la performance d'une cellule photovoltaïque mais que le Silicium de type n est un meilleur choix si la contamination métallique limite les performances de la cellule.

II.VI. Conclusion

Ce chapitre a donc permis de donner au lecteur les notions de base permettant de mieux comprendre le sujet d'étude. Nous avons mis en évidence les notions théoriques de la diffusion des atomes qui dépendent de l'élément à diffuser (Bore), avec la prise en compte des mécanismes au sein de la matrice du Silicium. La réalisation des émetteurs Bore p+ est généralement composée de deux étapes : l'étape de pré-dépôt et de redistribution afin de pouvoir définir les paramètres et les conditions de la diffusion par les différentes sources dopantes. Enfin nous avons cité les pertes théoriques et technologiques qui influent les paramètres de la cellule photovoltaïque.

Chapitre III : Partie expérimentale

III.I. Introduction

La simulation numérique, est une série de calculs effectués sur un ordinateur et reproduisant un phénomène physique. Elle aboutit à la description du résultat de ce phénomène, comme s'il s'était réellement déroulé. Cette représentation peut être une série de données, une image ou même un film vidéo. L'esprit de synthèse ne se contente pas d'un profil descriptif des comportements observables dans une expérience. Il essaye plutôt de formuler le phénomène par des lois ou des équations qui dans une étude réaliste sont loin d'être résolues par des approximations analytiques.

Cette partie consiste à traiter efficacement la simulation des profils de dopage par diffusion thermique, considérée comme une étape incontournable en technologie microélectronique, par des calculs basés sur les formules telle que la loi FICK et la méthode de mesure par sonde à quatre points d'une diffusion de surface.

III.II. Description du logiciel de simulation EDNA 2

III.II.1. Aperçu des programmes de simulation PV

Le logiciel de simulation des cellules et modules solaires est classé dans les domaines de :

- Optique ;
- Physique des cellules solaires et des semi-conducteurs ;
- Circuits ;
- Caractérisation et production ;
- Fonctionnement des systèmes PV ;
- Frais.

III.II.2. PV Lighthouse

Le site Web **PV Lighthouse** est une ressource en ligne gratuite pour les scientifiques et les ingénieurs photovoltaïques. Il fournit des calculateurs qui simulent divers aspects du fonctionnement des cellules solaires, une bibliothèque de données d'indice de réfraction et des liens vers des logiciels photovoltaïques.

Le logiciel a été Lancé en juin 2011, il est continuellement révisé et développé par Keith McIntosh, Malcolm Abbott, Ben Sudbury et de nombreux contributeurs de l'industrie photovoltaïque. Le trafic vers le site augmente rapidement et il reçoit actuellement environ 10 000 visites par mois. Le site Web fournit [70] :

- Calculatrices en ligne gratuites, rapides et sophistiquées ;
- Bibliothèques de matériaux et de données spectrales ;

- Héberge et fournit des liens vers le logiciel PV ;
- Conférences sur le PV.

Le diagramme ci-dessous présente une carte conceptuelle des modèles physiques utilisés par les calculateurs PVLighthouse.

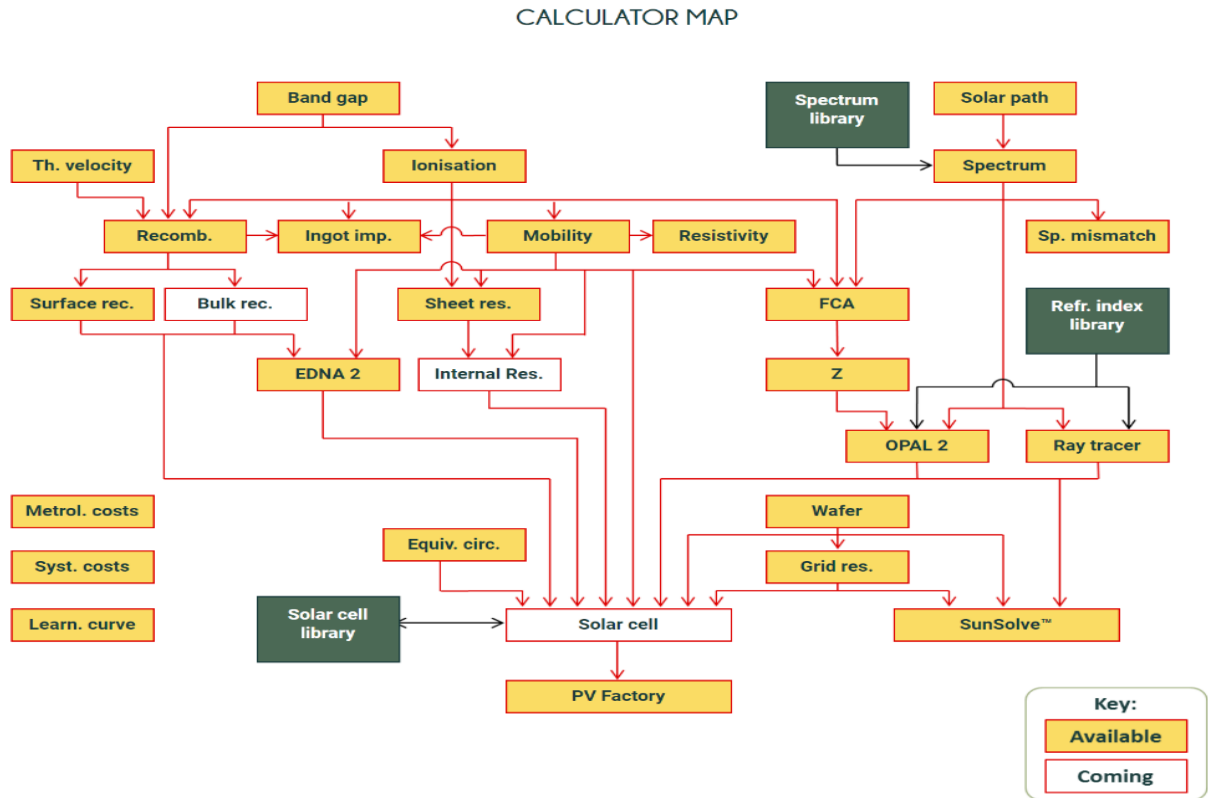


Figure (III. 1) : Diagramme des modèles physiques utilisés par les calculateurs PV Lighthouse [70].

III.II.3. Procédure générale du logiciel EDNA 2

L'algorithme de EDNA 2 (version 1-2) commence premièrement par charger les profils de dopant du fond et de l'émetteur, et calcule la résistance de la plaquette à l'équilibre en utilisant le **calculateur de résistance**. Par la suite, il passe à l'aide du **calculateur de la bande interdite**, au calcul des paramètres intrinsèques et d'équilibre du Silicium (concentrations du donneur ionisé ND^+ et de l'accepteur NA^- , la concentration effective des porteurs intrinsèques $n_{i,eff}$, l'énergie de la bande de conduction E_c , l'énergie de la bande de valence E_v , l'énergie de Fermi de l'électron E_{F_n} et l'énergie du trou de Fermi E_{F_p}) en fonction de la profondeur. EDNA 2 calcule après la recombinaison de surface et détermine les porteurs excédentaires en fonction de la profondeur. Cela nécessite l'appel au **calculateur de recombinaison**. Une fois que la densité de porteurs excédentaire est connue en fonction de la profondeur, la largeur effective de l'émetteur est déterminée ainsi que la tension de la jonction V_j et le courant de collecte J_j [71, 72].

III.II.4. Le calculateur de la résistance carrée

Ce calculateur détermine la résistance de couche d'un semi-conducteur dopé arbitrairement à l'équilibre (c'est-à-dire dans l'obscurité et sans tension appliquée).

Le calculateur simule une mesure par sonde à quatre points d'une diffusion de surface, telle que l'émetteur ou le champ de surface arrière d'une cellule solaire photovoltaïque. L'utilisateur peut soit générer un profil de dopant, soit télécharger un profil à partir d'un SIMS, d'un ECV ou d'une mesure de résistance à l'étalement. Le calculateur détermine ensuite la résistance de couche et la profondeur de jonction de la diffusion de surface à n'importe quelle température.

La résistance carrée ρ_{sq} à l'équilibre est déterminée à partir de la concentration nette de dopage ionisé $N(z)$ et de la mobilité des porteurs majoritaires μ_{maj} par l'équation [70]:

$$\rho_{sq} = \frac{1}{q \int_0^{Z_j} \mu_{maj}(z) \cdot N(z) \cdot dz} \quad (\text{III. 1})$$

Où Z_j est la profondeur de jonction et q est la charge d'un électron.

La concentration nette de dopage ionisé est définie comme :

$$N(z) = |N_A(z) - N_D(z)| \quad (\text{III. 2})$$

Où N_A et N_D sont la concentration ionisée des atomes accepteurs et donneurs. Dans le cas d'un semi-conducteur en Silicium, les atomes de Bore sont des accepteurs et les atomes de Phosphore sont des donneurs.

Un profil de dopage peut être téléchargé à partir d'un fichier CSV ou généré sous forme de fonction d'erreur exponentielle, gaussienne ou inverse (ERFC). Les équations de ces fonctions sont présentées ci-dessous. Le profil de dopage représente une diffusion de surface, telle qu'un émetteur ou un champ de surface arrière. Ceux-ci sont généralement créés en diffusant des atomes dopants dans le semi-conducteur à haute température, mais peuvent également être créés en implantant des atomes dopants à haute énergie. Une concentration de fond peut être incluse dans l'analyse, ce qui est nécessairement un profil de dopage uniforme.

La profondeur de jonction Z_j est définie comme suit : S'il n'y a pas de bruit de fond, Z_j est égal à la profondeur à laquelle se produit la concentration minimale admissible de dopant N_{min} , telle que définie sur la page « Option » ; si le fond et le profil de dopant sont de types opposés, Z_j est la profondeur à laquelle $|N_A(z) - N_D(z)|$ est égal à zéro ; et si les profils de fond et de dopant sont du même type, Z_j est égal à l'épaisseur de fond. Les deux dernières définitions ont été choisies pour que le simulateur renvoie la résistance de couche qui serait mesurée par une mesure de sonde idéale à quatre points.

III.II.5. Le calculateur de la bande interdite

Ce calculateur détermine la bande interdite du Silicium à n'importe quelle température, concentration de dopant et concentration en excès de porteur. Il détermine également l'énergie de la bande de conductance, de la bande de valence, du niveau de Fermi des électrons et du niveau de Fermi des trous, ainsi que la densité de porteurs intrinsèques effective à l'équilibre et à l'état d'équilibre. Le calculateur de la bande interdite suit un algorithme présenté dans [70].

Les sorties pour l'équilibre sont déterminées en définissant $\Delta n = p = 0$, tandis que les sorties pour l'état stable sont déterminées avec les valeurs d'entrée pour Δn et Δp .

III.II.6. Le calculateur des recombinaisons

Ce calculateur détermine la durée de vie effective et le taux de recombinaison dans le Silicium cristallin. Il calcule la recombinaison radiative, la recombinaison Auger et la recombinaison Shockley-Read-Hall en fonction de la concentration de dopant, de la concentration excessive de porteurs ou de la séparation des niveaux quasi-Fermi (parfois appelée tension en circuit ouvert implicite). Dont la somme donne le taux de recombinaison total [70]:

$$U_{\text{tot}} = U_{\text{rad}} + U_{\text{Aug}} + U_{\text{SRH}} \quad (\text{III. 3})$$

La durée de vie de chaque mécanisme est alors déterminée par :

$$\tau a = \frac{\Delta n_m}{U_a} \quad (\text{III. 4})$$

Où

' n_m ' est la concentration en excès de porteurs minoritaires,

' a ' représente soit 'rad', 'Aug' ou 'SRH'.

La durée de vie effective τ_{eff} est calculée de la même manière à partir de U_{tot} .

Le tableau (III.1) représente les fonctions des trois modèles de recombinaison (Auger et la recombinaison Shockley-Read-Hall).

Tableau (III. 1) : Equations de recombinaison présentées par EDNA 2 [70].

Modèle		Equation
Recombinaison Radiative	Aucune Coefficient personnalisé Autres	$U_{rad} = 0$ $U_{rad} = B \cdot (pn - n_{i\text{eff}}^2)$ $U_{rad} = (1.0391 \times 10^{-14} + 5.213 \times 10^{-12} * e^{-T/29.86338}) \cdot (pn - n_{i\text{eff}}^2)$
Recombinaison Auger	Aucune Coefficient personnalisé PC1D	$U_{aug} = 0$ $U_{aug} = (C_{nn} + C_{pp}) \cdot (pn - n_{i\text{eff}}^2)$ $U_{aug} = (C_{nn} + C_{pp}) \cdot (pn - n_{i\text{eff}}^2)$, avec $C_n = C_{n\text{LLI}} \cdot N_{D+} / (N_{D+} + P) + (C_{HLI} / 2) \cdot p(N_{D+} + P)$ $C_p = C_{p\text{LLI}} \cdot N_{A-} / (N_{A-} + n) + (C_{HLI} / 2) \cdot n(N_{A-} + P)$
Recombinaison Shockley-Read-Hall	Aucune Equation SRH	$U_{SRH} = 0$ $U_{SRH} = \frac{pn - n_{i\text{eff}}^2}{\tau_{n0}(p-p_1) + \tau_{p0}(n-n_1)}$, avec $\tau_{n0} = \frac{1}{v_{th e} \cdot \sigma_n N_t}$ Et $\tau_{p0} = \frac{1}{v_{th h} \cdot \sigma_p N_t}$ $n_1 = n_{i\text{eff}} \cdot \exp\left(\frac{E_t - E_i}{K_B T}\right)$ Et $p_1 = n_{i\text{eff}} \cdot \exp\left(\frac{E_i - E_t}{K_B T}\right)$

Où σ_n et σ_p sont les sections efficaces de capture des électrons et des trous, $v_{th e}$ et $v_{th h}$ sont les vitesses thermiques des électrons et des trous, N_t est la concentration des états de défaut et E_t est l'énergie de l'état de défaut. On suppose que $N_t \ll p, n$, et que le semi-conducteur n'est pas dégénéré.

III.II.7. Équations pour le profil de dopage

On peut choisir parmi quatre équations où toutes sont définies par une concentration maximale N_p , la profondeur de la concentration maximale Z_p et un facteur de profondeur Z_f .

PC1D définit Z_f de telle sorte que les équations gaussiennes et ERFC aient la forme la plus simple.

Tableau (III. 2) : Equations de profile de dopage (Z_f : forme gaussienne et ERFC) [70].

Uniforme	$N(z) = N_p$ for $z \leq Z_p$ and $N(z) = 0$ for $z > Z_p$
Exponentielle	$N(z) = N_p \cdot \exp[- z - Z_p / Z_f]$
Gaussienne	$N(z) = N_p \cdot \exp[-(z - Z_p)^2 / Z_f^2]$

ERFC	$N(z) = N_p \cdot \{1 - \text{erf} [(z - Z_p) / Z_f]\}$
------	---

L'approche traditionnelle de l'utilisation des équations gaussiennes et ERFC consiste à définir l'écart type comme troisième paramètre d'entrée. Dans ce calculateur, l'utilisateur peut choisir de définir Z_f comme écart type, auquel cas les profils sont définis comme suit.

Tableau (III. 3) : Equations des profils de dopage (Z_f : forme écart type) [70].

Uniform	$N(z) = N_p$ for $z \leq Z_p$ and $N(z) = 0$ for $z > Z_p$
Exponentielle	$N(z) = N_p \cdot \exp[- z - Z_p / Z_f]$
Gaussienne	$N(z) = N_p \cdot \exp\{-[(z - Z_p) / (Z_f \cdot \sqrt{2})]^2\} / [Z_f \cdot \sqrt{(2\pi)}]$
ERFC	$N(z) = N_p \cdot \{1 - \text{erf}[(z - Z_p) / (Z_f \cdot \sqrt{2})]\}$


Une limite maximale à la concentration de dopant électriquement actif peut être attribuée. Cette limite maximale peut être utilisée pour représenter la limite de solubilité solide de l'espèce dopante à une température de procédé particulière.

III.III. La simulation par EDNA 2

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

Après le lancement de PV Lighthouse, il nous permet de définir toutes les étapes de la simulation. Ces étapes sont les suivantes :

- Définir le matériau utilisé pour notre jonction 'c-Silicon'.
- Définir le matériau utiliser au fond/surface 'Phosphore/Bore'.
- Définir les paramètres, les équations et les variables pour le modèle.



EDNA 2
CALCULATORS SIMULATION RESOURCES CONTRIBUTORS PV LIGHTHOUSE

Calculator

Upload profile

About

INPUTS

Material inputs

Background

Dopant species: **Boron**

Concentration: $N_b = 1E+16 \text{ cm}^{-3}$

Resistivity: $\rho_b = 1,46 \text{ } \Omega\text{-cm}$

Emitter

Dopant species: **Phosphorus**

Profile: **Generated**

Sheet resistance: $\rho_{sq} = 117 \text{ } \Omega/\text{sq}$

Excitation

Temperature: **300 K**

Specified voltage: $V_j \text{ spec} = 0,55 \text{ V}$

Recombination models

Radiative: **Trupke2003 fit**

Auger: **Richter 2013**

SRH at surface: **SnO, SpO, EIT & QF**

SRH in emitter: **SRH equation**

Generation inputs

Spectrum: **Monochromatic light**

Wavelength: $\lambda = 300 \text{ nm}$

Absorption coeff.: $\alpha = 1,77E+6 \text{ cm}^{-1}$

Options

Mobility and band gap models

Mobility model: **Klaassen1992**

Intrinsic band gap: **Passler2002**

Density of states: **Sentaurus2008 DOS Form. 2**

Dopant ionisation: **Altermatt2006**

Carrier statistics: **Fermi-Dirac**

Band gap narrowing: **Schenk1998**

Miscellaneous inputs

Definition of x_f : **PC1D**

Significant figures: **3**

Effective depth of the emitter is defined as first point where either

Condition 1: $n_0 = 10 \times N_b$

Condition 2: $n_0 = 1 \times \Delta n(x)$

OUTPUTS

Major outputs

Emitter sheet resistance at equilibrium	$\rho_{sq} = 117 \text{ } \Omega/\text{sq}$
Emitter saturation current at 0,550 V	$J_{0E} = 64,5 \text{ fA/cm}^2$
Emitter collection efficiency at short-circuit	$\text{IQE}_E = 93,8 \text{ \%}$

Outputs under no illumination (dark)

Dark outputs		Breakdown of J_{0E}	
Emitter saturation current	$J_{0E} = 64,5 \text{ fA/cm}^2$	Mechanism	fA/cm ² %
Transparency factor	$\alpha_f = 77,2 \text{ \%}$	Radiative	0,02 0,04
Effective emitter width	$W_E = 0,617 \text{ } \mu\text{m}$	Auger	14,63 22,69
Calculated at J_n voltage	$V_j = 0,550 \text{ V}$	SRH at surface	49,80 77,23
		SRH in emitter	0,03 0,05
		Total	64,48 100,00

Outputs under illumination (light)

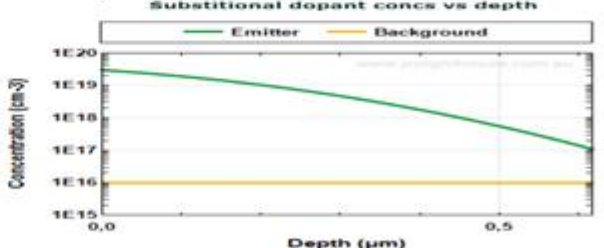
	At short-circuit	At open-circuit	At specified voltage
Eff emitter width (μm):	0,617	0,617	0,617
Junction voltage (V):	4,38E-4	0,701	0,550
Currents (mA/cm²)			
Radiative recomb.	0,00 0,00%	0,01 0,04%	0,00 0,00%
Auger recomb.	0,39 0,96%	8,90 22,25%	0,41 1,03%
SRH recomb. at surface	2,09 5,22%	31,07 77,67%	2,18 5,44%
SRH recomb. in emitter	0,00 0,00%	0,02 0,04%	0,00 0,00%
Collected carriers	37,52 93,81%	0,00 0,00%	37,41 93,53%
Generated in emitter	40,00 100,00%	40,00 100,00%	40,00 100,00%

Plot parameters vs depth

Y-axis: **Substitutional dopant conc**

X-axis: **Depth**

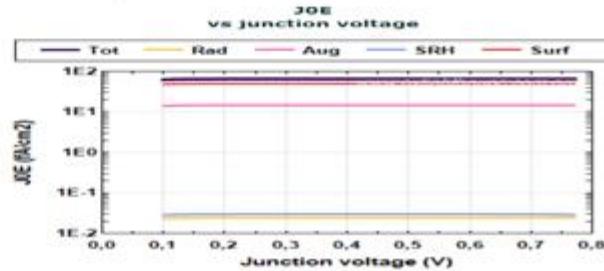
Conditions: **Dark**



Sweep parameter and plot

Y-axis: **JOE**

X-axis: **Junction voltage**



Computation time 1.050 s.

Figure (III. 2) : Interface du calculateur EDNA 2 / émetteur [70].

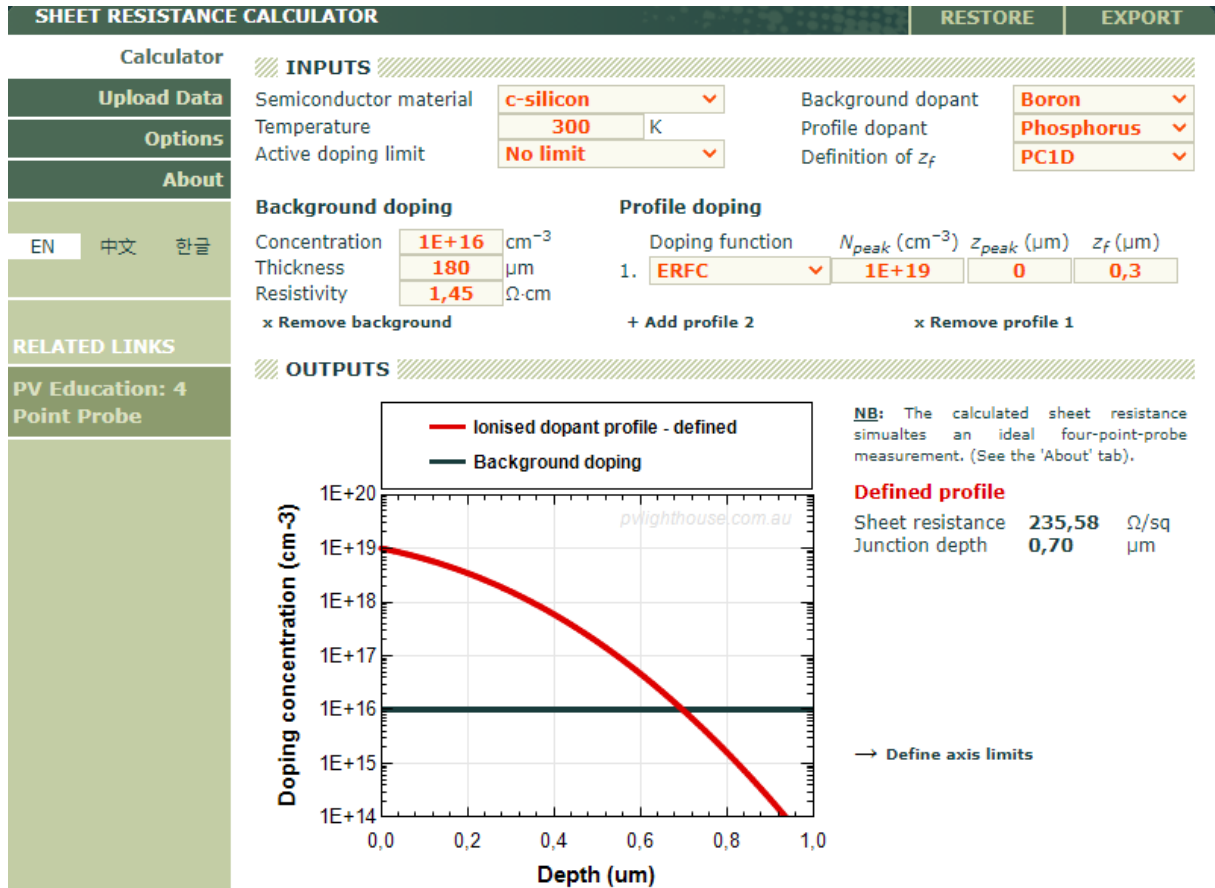


Figure (III. 3) : Interface du calculateur de la résistance carrée [70].

IV. Conclusion

Ce chapitre a présenté quelques informations de base sur le simulateur EDNA 2, ainsi que les équations et paramètres utilisés dans cette simulation. La présentation de ces outils ainsi que leur permettent de mieux comprendre les résultats obtenus au cours de la partie expérimentale et ceux de la partie de simulation.

Chapitre IV :

Résultats et

discussion

IV.I. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de la simulation numérique réalisés par le logiciel EDNA 2 d'une cellule solaire à base de Silicium et leurs interprétations. Nous allons discuter de l'impact des principaux paramètres du procédé de dopage Bore pouvant être modifiés, car la qualité de l'émetteur p^+ est liée aux conditions de diffusion thermique. Nous avons effectué une modélisation du comportement de trois paramètres (concentration, pic de concentration et le facteur de profondeur) sur l'allure du profil de diffusion, ainsi que leur influence sur quelques paramètres externes de la cellule solaire tel que la densité de courant de saturation de l'émetteur et la résistance carrée afin d'optimiser la passivation de la jonction de type n.

Dans toutes nos simulations nous avons pris une température de 300K avec un substrat de 180 μm d'épaisseur. La température a été choisie car elle joue un rôle déterminant dans la fabrication de la jonction et permet en outre de maintenir le temps global du procédé de dopage acceptable pour un procédé industriel.

IV.II. Description de la structure utilisée

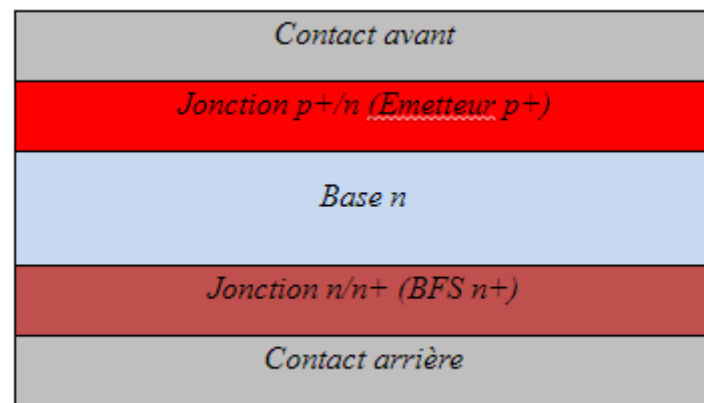


Figure (IV. 1) : Description schématique de la structure étudiée.

Sur la Figure ci-dessus on considère une structure n/p^+ à base de Silicium de type n que nous avons simulé. Dans notre cas, On s'intéresse aux profils de la concentration du Bore dans le Silicium type n.

IV.III. Paramètres de la simulation

Les paramètres que nous avons utilisés pour le calcul sont représentés dans le tableau (IV-1).

Tableau (IV. 1) : Paramètres de simulation de la jonction.

Input	Value
EDNA Version	2.5.6
Température (K)	300
Tension de la jonction (V)	0,55
Espèces de dopant de fond	Phosphorus
Conc de dopant de fond (cm-3)	1E+16
Résistivité de fond (Ohm-cm)	0,529
Espèce de dopant émetteur	Boron
Profil dopant émetteur	Generated
Fonction émetteur 1	ERFC
Fonction 1 Npeak (cm-3)	1E+20
Fonction 1 Zpeak (μm)	0,1
Fonction 1 Zf (μm)	0,1
Modèle de recombinaison radiative	Trupke2003 fit
Modèle de recombinaison auger	Richter2012
SRH en surface	Sn ₀ . Sp ₀ . Eit & Qf
Sn0 (cm/s)	10000
Sp0 (cm/s)	10000
Eit – Ei (eV)	0
Qf (cm-2)	0
SRH en émetteur	SRH équation
τn0 (μs)	100
τp0 (μs)	100
Et-Ei (eV)	0
Spectre	Monochromatic light
Longueur d'onde (nm)	300
Intensité de l'incident (mA/cm2)	40
Fraction de transmission	1
Angle de propagation (°)	0
Modèle de mobilité	Klaassen1992
Modèle de bande interdite intrinsèque	Passler2002
Multiplicateur de bande interdite	1,00547
Modèle de densité d'états	Sentaurus2008 DOS Form. 2
Modèle d'ionisation de dopant	Altermatt2006
Modèle de statistiques de transporteur	Fermi-Dirac
Modèle de rétrécissement de bande interdite	Schenk1998
Définition de Zf	PC1D
Profondeur de l'émetteur condition 1	10
Profondeur de l'émetteur condition 2	1

IV.IV. L'effet des principaux paramètres du procédé de diffusion sur la jonction p+

IV.IV.1. L'effet de la concentration sur l'épaisseur de la jonction pour différentes profondeurs

Dans cette partie on a utilisé comme paramètre fixe le pic de concentration Z_p d'une valeur nulle, une variation de la concentration en surface du Bore N_p ($1.e+19$, $5.e+19$ et $1.e+20\text{cm}^{-3}$) et un facteur de profondeur Z_f de valeurs (0.1, 0.2 et 0.3). C'est la variation de la valeur de ce dernier facteur qui va définir par la suite la profondeur de la jonction X_j .

Les figures (IV.2.a), (IV.2.b) et (IV.2.c) montrent respectivement les profils de concentration du dopant en fonction de la profondeur de l'émetteur p+ dans le Silicium de type n des trois valeurs du facteur de profondeur.

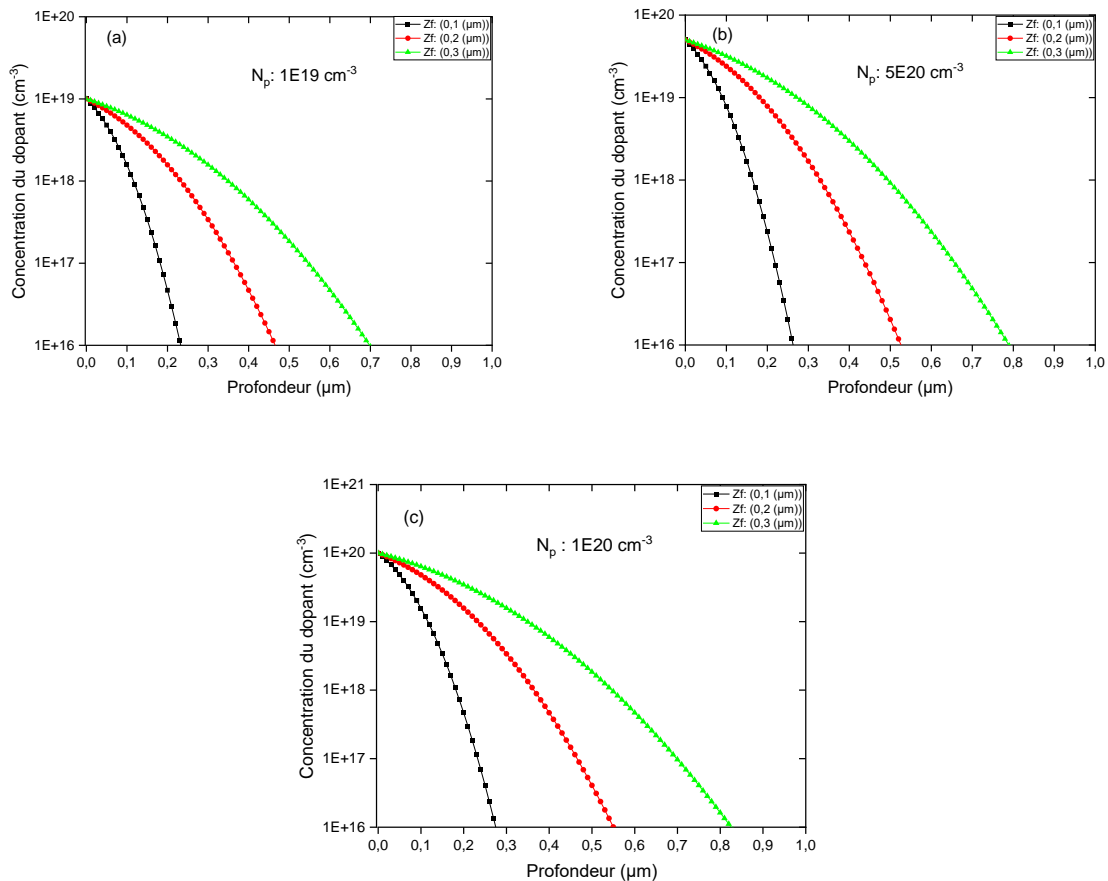


Figure (IV. 2) : Profil de concentration du Bore.

Dans la figure (IV.2.a) on remarque que plus la concentration augmente (de $1.e+19$ à $1.e+20\text{ cm}^{-2}$). La profondeur de diffusion augmente respectivement (de 0.23 , 0.27 et $0.28\text{ }\mu\text{m}$). La même remarque est faite pour les autres Z_f (0.2 et 0.3).

Ce comportement caractéristique indiquant une chute profonde de dopant en profondeur est observé avec la diminution des facteurs.

Pour une valeur donnée de Z_f , la profondeur de la jonction est proportionnelle à la concentration en surface N_p . Autrement dit, lorsque la concentration du Bore en surface augmente, la profondeur de la jonction X_j augmente. Cela peut être expliqué par la dépendance de la diffusion du Bore dans le Silicium par la quantité ou bien la concentration du Bore contenu dans une source dopante.

D'après l'équation (III. 1) précédemment mentionnée, La résistance carrée à l'équilibre est inversement proportionnelle à la profondeur de la jonction ce qui signifie que la résistance carrée diminue avec l'augmentation de la profondeur de la jonction, c'est-à-dire lorsqu'on augmente Z_f la résistance carrée diminue d'autre part la profondeur de la jonction et le courant de saturation augmentent. Cela est clairement prouvé grâce aux résultats présentés dans le tableau (IV. 2).

IV.IV.2. L'effet de la concentration sur la densité de courant de saturation pour plusieurs profondeurs

La figure (IV.3) représente la variation de densité de courant surfacique en fonction de l'effective SRV (la vitesse de quand le pic de concentration est nul.

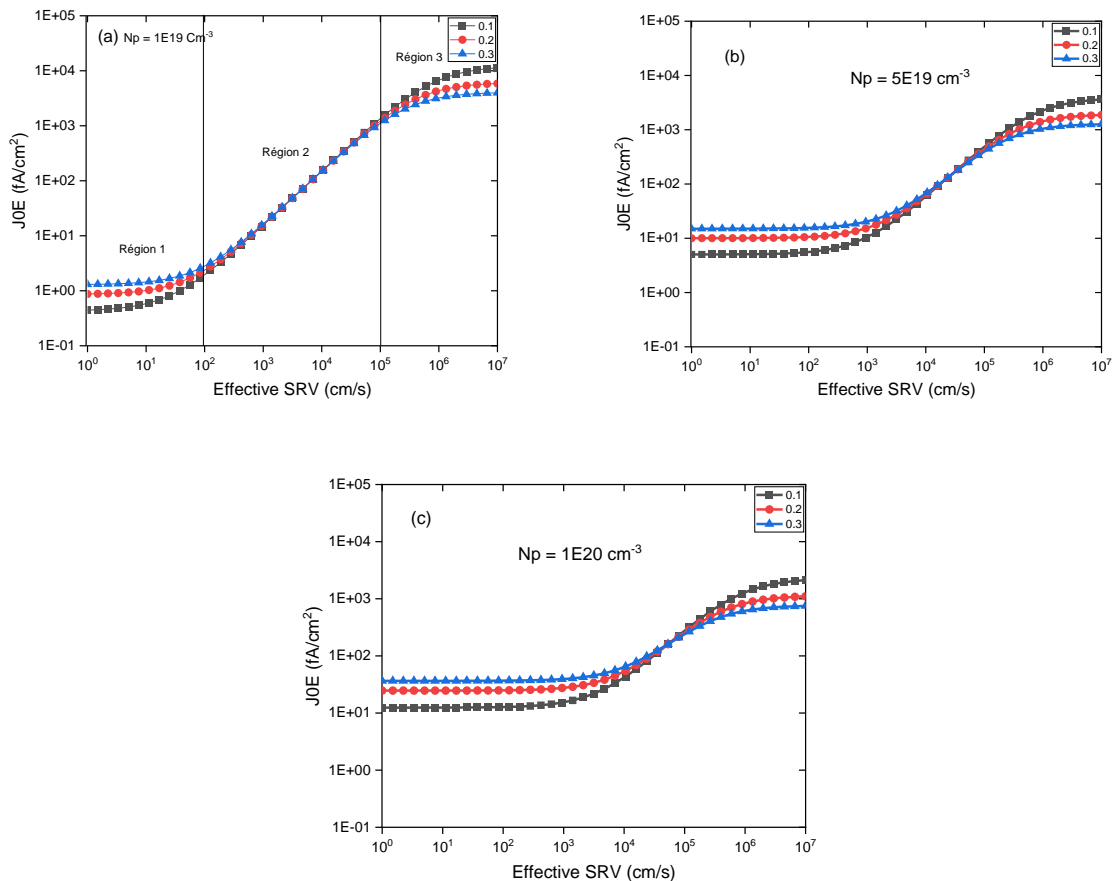


Figure (IV. 3) : La variation de la densité de courant de saturation en fonction de la vitesse effective de recombinaison en surface de l'émetteur.

Les courbes de la figure (IV.3.a) présentent trois régions, un palier en région une ($1 < SRV_{eff} < 10^2$), une variation linéaire dans la région deux, et un palier de saturation dans la région trois.

Dans la région une, à la surface ($SRV_{eff} = 1$ cm/s) quand Z_f varie de 0.1 à 0.3 la densité de courant de saturation augmente de 0.8 à 1,2 fA/cm². Dans la région deux, quelle que soit la variation de Z_f les courbes se superposent. Dans la région trois, on remarque le phénomène inverse, Z_f augmente le courant diminue.

Dans les figures (IV.3.b) (IV.3.c) la région linéaire devient un point d'inflexion. (C'est pour cela que les courbes renversent, on le voit très bien à la figure (IV.3.c) quand N_p est de $(1.e+19$ cm⁻³).

Il est observé que la densité de courant de saturation est toujours positive, ce qui signifie que la jonction est polarisée en direct.

En utilisant principalement les niveaux de concentration des impuretés et les concentrations intrinsèques de porteurs, il est possible d'estimer les courants de saturation pour les jonctions. La densité de courant de saturation représente la somme de tous les mécanismes de recombinaison. La densité de courant de saturation augmente avec l'augmentation de la concentration du dopant cela peut être expliqué grâce à l'équation (I.1), on note que j_0 devient [17] :

$$J_0 = \frac{qD_{nn}^2}{L_N N_A} + \frac{qD_{pp}^2}{L_P N_D} \quad (IV. 1)$$

La concentration de dopage affecte la LARGEUR de la barrière -- une N_D plus importante rendra la barrière plus mince et sachant que : $\phi = E_g - \phi_0$, où E_g est l'énergie de gap et ϕ_0 est le niveau de l'état de surface qui est épinglé au niveau de Fermi. Pour une concentration de dopage plus faible, ϕ_0 sera plus faible et la hauteur de barrière augmente, ce qui conduit à une plus grande hauteur de barrière et par conséquent à un courant inverse beaucoup plus faible.

Le tableau IV.2 regroupe les paramètres utilisés pour réaliser la simulation des profils du Bore, ainsi que les résultats trouvés pour la résistance carrée, la densité de courant de saturation et l'efficacité de collecte d'émetteur au court-circuit.

Tableau (IV. 2) : Résultats obtenue pour $Z_p = 0$.

	Concentration du dopant N_p	Pique de concentration Z_p	Facteur de profondeur Z_f	Résistance carrée R_s	Profondeur de la jonction	Densité de courant de saturation J_{0e}	Rendement
(a)	1.e+19	0	0.1	1203,63	0,23	150	98,9
	1.e+19	0	0.2	602,24	0,47	148	97,7
	1.e+19	0	0.3	401,54	0,70	147	96,5
(b)	5.e+19	0	0.1	356,13	0,26	59,0	98,6
	5.e+19	0	0.2	178,23	0,53	63,0	97,0
	5.e+19	0	0.3	118,84	0,79	66,8	95,3
(c)	1.e+20	0	0.1	199,17	0,28	41,7	98,5
	1.e+20	0	0.2	99,68	0,55	53,0	96,3
	1.e+20	0	0.3	66,47	0,83	63,6	93,5

Le tableau ci-dessus présente les résultats des simulations lorsque le pic de concentration est égal à 0 μm . La simulation concerne l'effet de la concentration, le pic de concentration et le facteur de profondeur sur la résistance carrée, la densité de courant de saturation, la profondeur de la jonction et le rendement de la jonction p+.

D'après le tableau IV.2, la résistance carrée, la profondeur de la jonction et la densité de courant de saturation dépend du facteur de profondeur. La diminution de la résistance carrée observée lorsque le facteur de profondeur augmente peut-être due soit à l'augmentation de la dose de dopant, soit de la mobilité des porteurs.

Les valeurs des doses du Bore présentées dans le tableau (IV.2) signifient que la diminution de la résistance carrée observée provient donc principalement d'une augmentation de la concentration.

Le rendement (l'efficacité) suit la même tendance que la résistance carrée, par contre la densité de courant de saturation prend une faible valeur lorsque la jonction est de forte concentration et l'épaisseur de l'émetteur est inférieur à 0,3 μm . La densité de courant de saturation diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de la jonction pour les fortes doses (5.e+19 et 1.e+20).

IV.IV.3 L'effet du pic de concentration Z_p et du facteur de profondeur Z_f sur l'épaisseur de la jonction p+

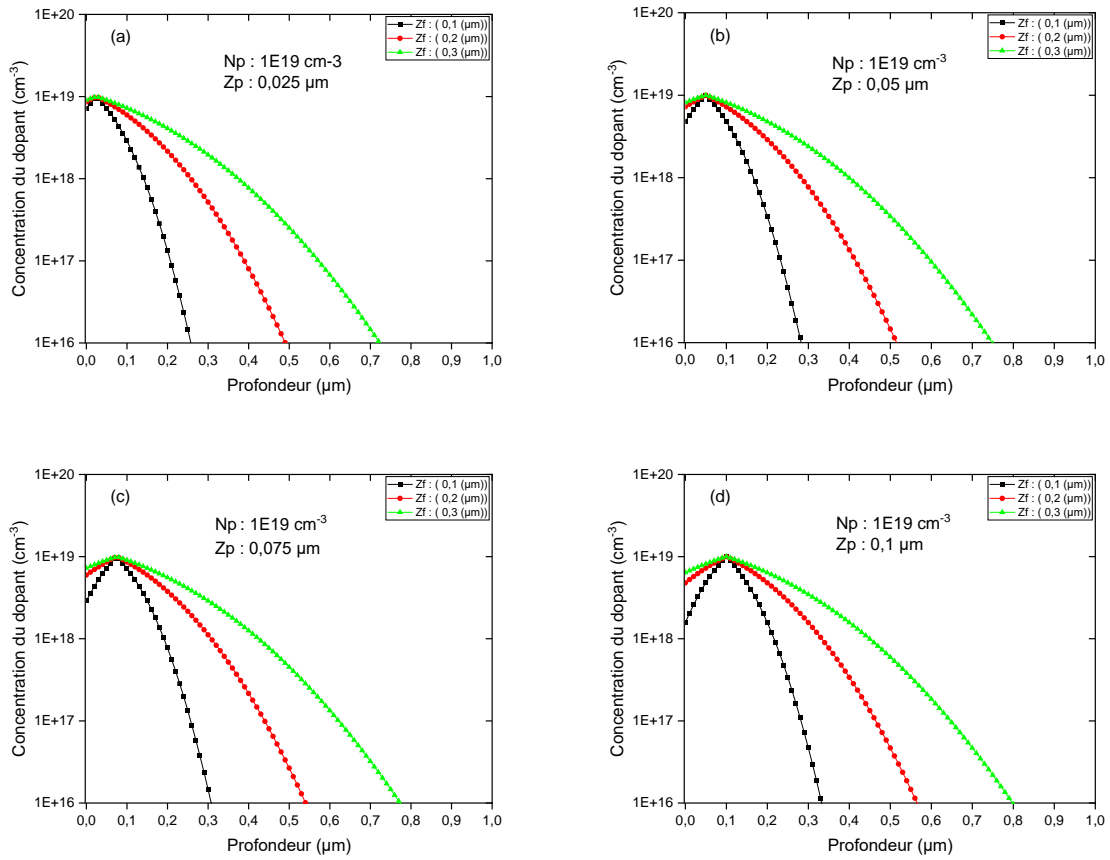


Figure (IV. 4) : Profil de concentration du Bore pour une dose de 1.e+19 cm⁻³.

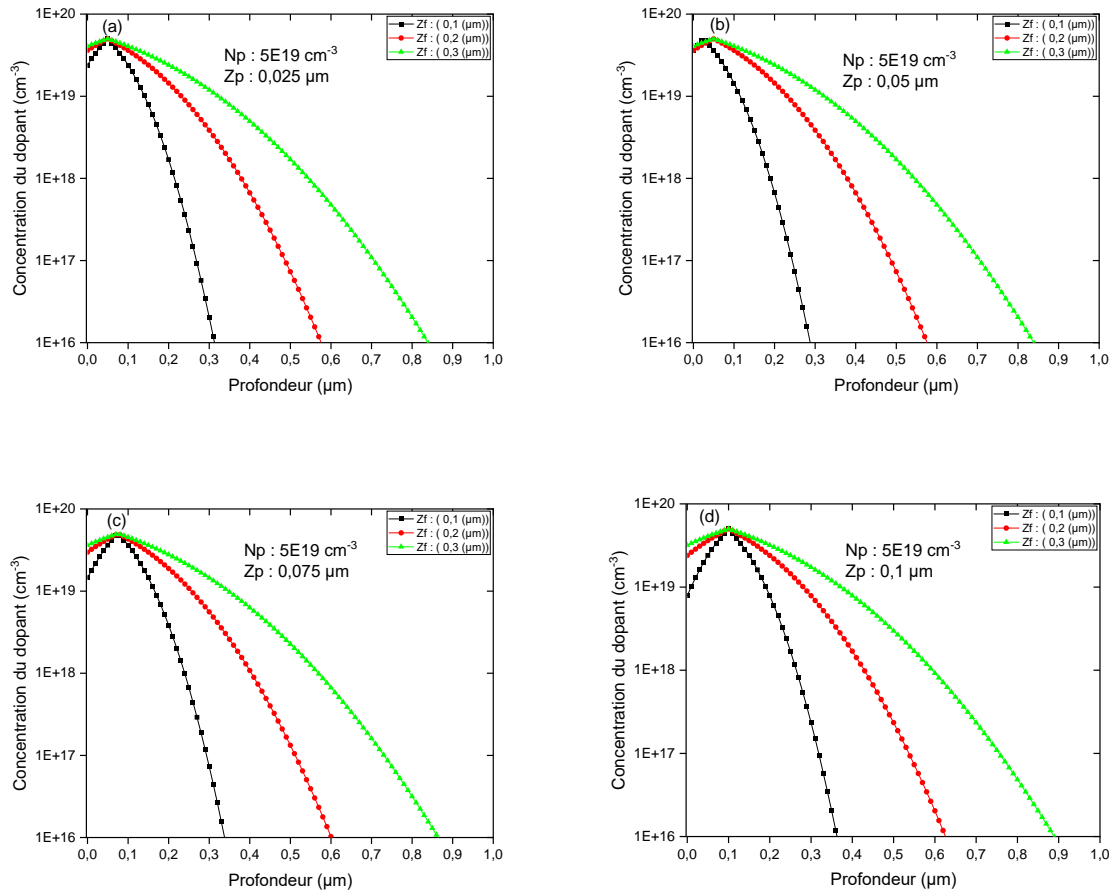


Figure (IV. 5) : Profil de concentration du Bore pour une dose de $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$.

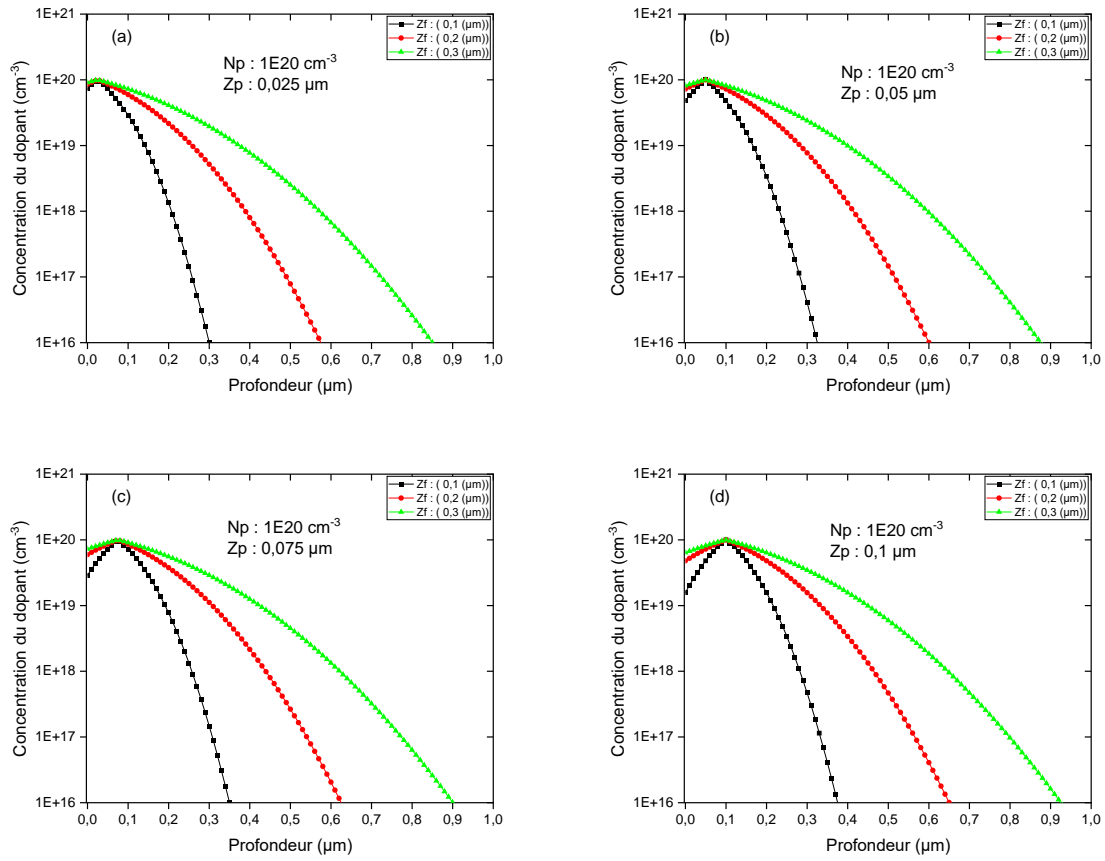


Figure (IV. 6) : Profil de concentration du Bore pur une dose de $1.\text{e}+20 \text{ cm}^{-3}$.

Les figures (IV.4), (IV.5) et (IV.6) représentent le profil de concentration du Bore pour plusieurs valeurs de Z_p (0.025, 0.05, 0.075 et 0.1 μm).

Toutes les figures présentent une forme gaussienne. On remarque bien une augmentation de la concentration en surface N_s , ainsi que la profondeur de la jonction p^+ , lorsque le facteur de profondeur augmente. L'augmentation de ce dernier (Z_f) permet d'insérer plus le Bore dans le Silicium.

D'après l'équation (III. 1) et sachant les équations pour les profils de dopage précédemment mentionnées, La résistance carrée à l'équilibre est proportionnelle à la profondeur pour $z \leq Z_p$ (augmentation) puis devient inversement proportionnelle à la profondeur de la jonction pour $z > Z_p$, où la résistance carrée diminue avec l'augmentation de la profondeur de la jonction cela est clairement prouvé grâce aux résultats présentés dans les tableaux (IV. 3, IV.4 et IV.5).

On observe une présence d'un pic pour toutes doses de concentration.

- Le pic correspond à la valeur maximale de la concentration
- Le pic se déplace vers les plus grandes profondeurs, quand Z_f augmente (Exemple: figure IV.7) pour une concentration de $1.e+19 \text{ cm}^{-3}$. Même allure pour les autres concentrations).
- Le pic est compris étant une agglomération du Bore qui se fait de plus en plus en profondeur.

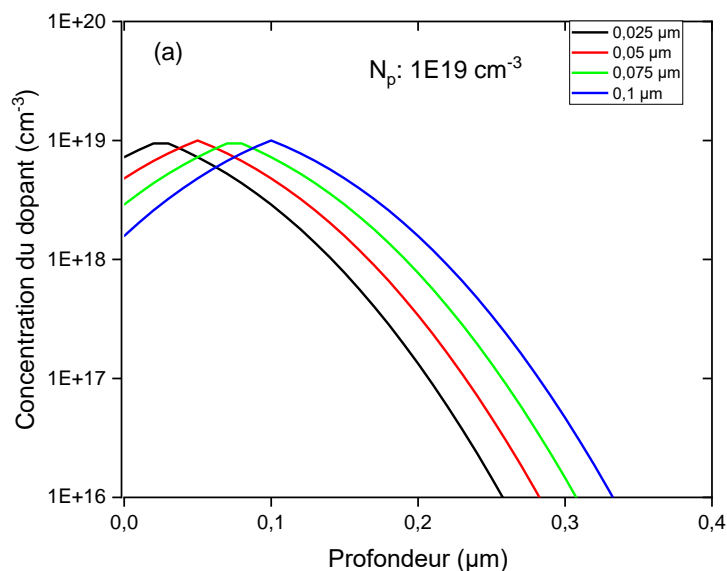


Figure (IV. 7) : Profil de concentration du Bore.

IV.IV.4. L'effet du pic de concentration Z_p et du facteur de profondeur Z_f sur la densité de courant de saturation de la jonction p+

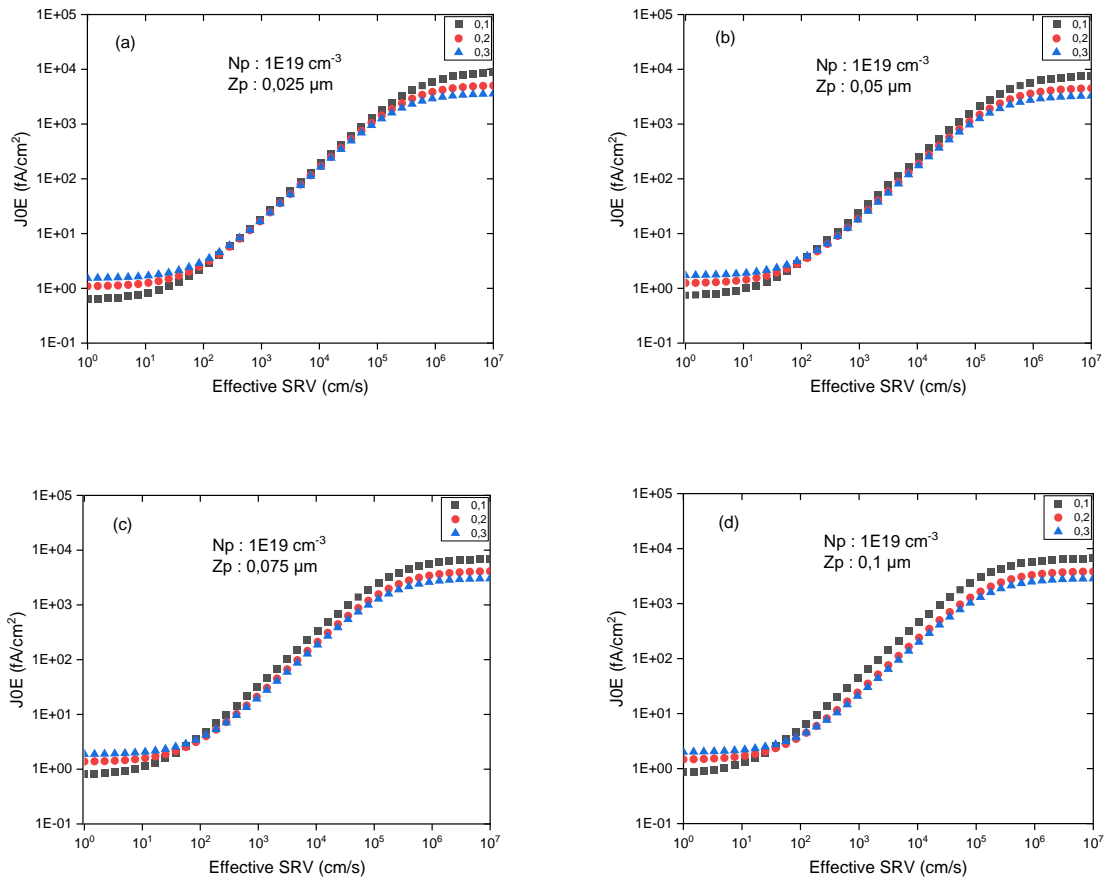


Figure (IV. 8) : La variation de la densité de courant surfacique en fonction de l'effective SRV pour une concentration de $1.e^{+19} \text{ cm}^{-3}$.

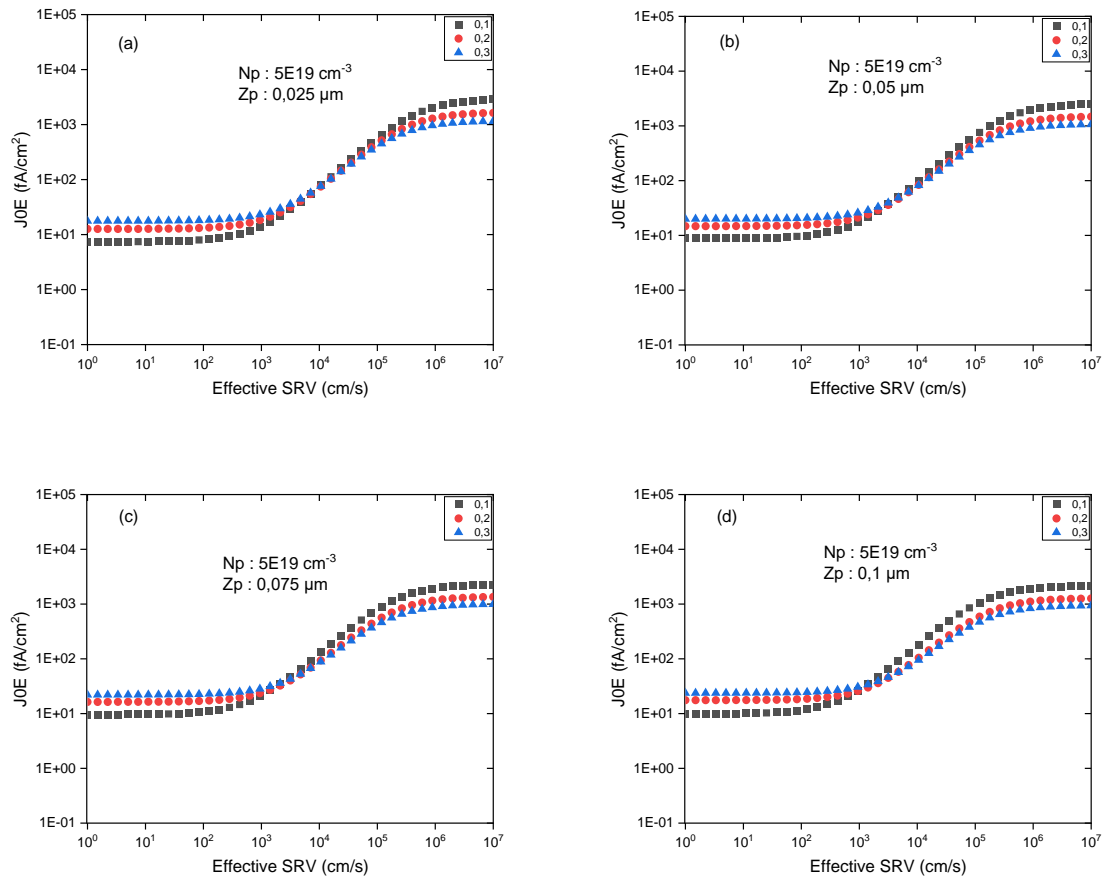


Figure (IV. 9) : La variation de la densité de courant surfacique en fonction de l'effective SRV pour une concentration de $5.e^{+19} \text{ cm}^{-3}$.

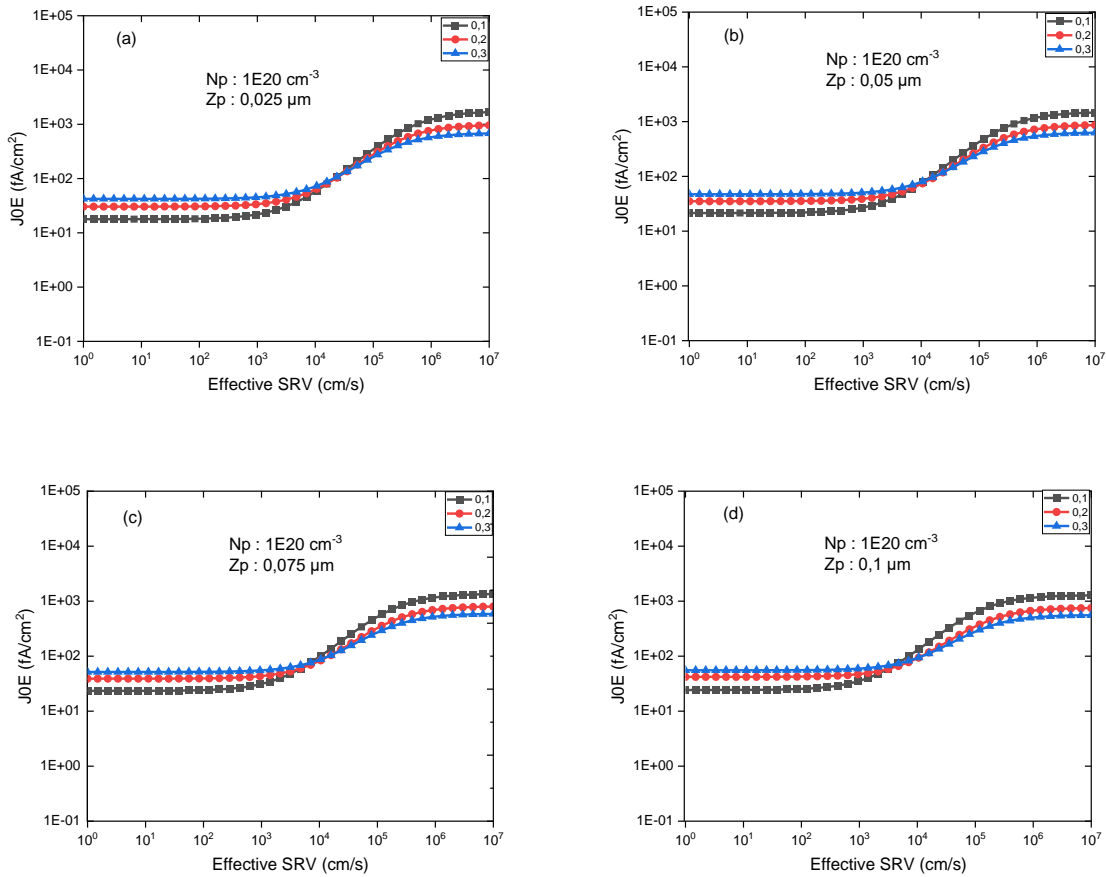


Figure (IV. 10) : La variation de la densité de courant surfacique en fonction de l'effective SRV pour une concentration de $1.e^{+20} \text{ cm}^{-3}$.

Les figures (IV.8) (IV.9) et (IV.10) représentent la variation de densité de courant surfacique en fonction de l'effective SRV (la vitesse de recombinaison quand le pic de concentration est variable (0.025, 0.05, 0.075, 0.1)

On observe que les trois courbes des trois doses de concentration ont une même allure qui augmente en fonction de l'effective, et débutent par des différentes valeurs quand l'effective SRV est de 1 cm/s (en surface). Dans le premier cas ou la dose de concentration d'émetteur est fixée à $1.e+19 \text{ cm}^{-3}$ on observe qu'il y a une identification de densité de courant des trois facteurs de profondeur ou l'effective est bornée entre 10^2 et 10^5 cm/s (région 2). La valeur minimale de densité de courant est notée au départ (en surface), et est toujours marquée ou le facteur de profondeur est de 0,1 um, par contre quand il s'agit de 0,2 et 0,3 on distingue des valeurs supérieures. Les courbes prennent un point d'interligne (région 2) ou les courbes du courant de densité se superposent et augmentent jusqu'à la formation d'un palier de saturation (région 3).

L'augmentation du Z_f , Z_p et N_p rend les courbes presque linéaire (l'intervalle des valeurs des densité diminue de $[0,8-1.e+4]$ à $[30-1.e+3]$).

On remarque que la croissance de la densité de courant de saturation est liée à l'augmentation de la vitesse de recombinaison en surface d'émetteur. Ce qui signifie la présence des pertes en surface de la cellule solaire qui sont modélisées par une recombinaison en surface ayant une vitesse, qui caractérise la qualité des surfaces.

On exprime le courant j sous une autre forme :

$$J_n = e \Delta n S$$

S est vitesse de recombinaison en surface, Δn et $d\Delta n/dx$ sont respectivement la densité de porteurs excédentaires et son gradient, à la surface.

Le phénomène de recombinaison SRH en surface se produit par la présence de l'interruption de la périodicité du cristal fait apparaître de nouveaux états de surface.

Tableau (IV. 3) : Tableau des résultats obtenues à $1.e+19 \text{ cm}^{-3}$.

Concentration du dopant N_p	Pique de concentration Z_p	Facteur de profondeur Z_f	Resistance carrée R_s	Profondeur de la jonction X_j	Densité de courant de saturation J_{0e}	Rendement de la jonction IQE_E
1.e+19	0.025	0.1	924,42	0,26	182	98,1
1.e+19	0.025	0.2	518,76	0,49	162	97,0
1.e+19	0.025	0.3	361,92	0,72	155	95,8
1.e+19	0.050	0.1	781,92	0,28	234	97,1
1.e+19	0.050	0.2	461,44	0,52	179	96,2
1.e+19	0.050	0.3	331,44	0,75	165	95,1
1.e+19	0.075	0.1	704,76	0,31	312	95,7
1.e+19	0.075	0.2	421,11	0,54	201	95,3
1.e+19	0.075	0.3	307,73	0,77	176	94,4
1.e+19	0.100	0.1	657,64	0,33	430	93,7
1.e+19	0.100	0.2	391,16	0,57	228	94,3
1.e+19	0.100	0.3	288,69	0,80	190	93,4

Tableau (IV. 4) : Tableau des résultats obtenues à $5.e+19 \text{ cm}^{-3}$.

Concentration du dopant N_p	Pique de concentration Z_p	Facteur de profondeur Z_f	Resistance carrée R_s	Profondeur de la jonction X_j	Densité de courant de saturation J_{0e}	Rendement de la jonction IQE_E
5.e+19	0.025	0.1	268,02	0,29	74,6	97,7
5.e+19	0.025	0.2	151,41	0,55	71,1	96,1
5.e+19	0.025	0.3	106,02	0,81	72,7	94,4
5.e+19	0.050	0.1	226,01	0,31	95,1	96,5
5.e+19	0.050	0.2	133,73	0,58	79,8	95,1
5.e+19	0.050	0.3	96,440	0,84	78,6	93,4
5.e+19	0.075	0.1	204,83	0,34	124	94,9
5.e+19	0.075	0.2	121,74	0,60	89,4	94,0
5.e+19	0.075	0.3	89,190	0,86	84,7	92,4
5.e+19	0.100	0.1	192,46	0,36	171	92,3
5.e+19	0.100	0.2	113,08	0,63	100	92,8
5.e+19	0.100	0.3	83,490	0,89	91,0	91,3

Tableau (IV. 5) : Tableau des résultats obtenue à $1.e+20 \text{ cm}^{-3}$.

Concentration du dopant N_p	Pique de concentration Z_p	Facteur de profondeur Z_f	Resistance carrée R_s	Profondeur de la jonction X_j	Densité de courant de saturation J_{0e}	Rendement de la jonction IQE_E
1.e+20	0.025	0.1	148,67	0,30	57,1	97,2
1.e+20	0.025	0.2	84,240	0,58	62,7	94,9
1.e+20	0.025	0.3	59,070	0,85	71,3	92,0
1.e+20	0.050	0.1	125,09	0,33	75,0	95,7
1.e+20	0.050	0.2	74.170	0,60	72,2	93,4
1.e+20	0.050	0.3	53,590	0,88	78,7	90,4
1.e+20	0.075	0.1	113,48	0,35	97,3	93,7
1.e+20	0.075	0.2	67,420	0,63	81,6	91,8
1.e+20	0.075	0.3	49,470	0,90	85,7	88,8
1.e+20	0.100	0.1	106,86	0,38	128	90,9
1.e+20	0.100	0.2	62,590	0,65	91,2	90,2
1.e+20	0.100	0.3	46,250	0,93	92,4	87,2

Les tableaux (IV.2), (IV.3) et (IV.4) présentent les variations des performances de la jonctions p+ pour différentes doses de concentration.

On constate que l'épaisseur de l'émetteur X_j a une influence sur le rendement : plus elle est grande, plus le rendement diminue fortement. On peut expliquer ce phénomène grâce à la longueur de diffusion L_D , qui représente la longueur jusqu'à laquelle va diffuser.

On remarque aussi que la résistance carrée diminue avec l'augmentation de la profondeur de l'émetteur jusqu'à 46.250, pour une épaisseur maximale (0.93) le rendement pour cette épaisseur prend une valeur minimale de 87.2, ainsi qu'une diminution de la densité de courant de saturation.

Ces résultats s'expliquent par le fait de la longueur de diffusion des porteurs, plus l'épaisseur de l'émetteur augmente, plus le taux de recombinaisons est important alors une diminution la densité de courant de saturation et de la résistance carrée. Cette variation est liée aussi à l'augmentation de la dose du Bore.

IV.V. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons utilisé le logiciel EDNA 2 pour étudier l'effet des paramètres électriques (concentration) et technologique (profondeur) de l'émetteur dans le but de concevoir une structure optimale qui donne une meilleure qualité de passivation (idéale) d'une jonction de type n.

L'augmentation de la largeur de l'émetteur provoque une chute dans les performances de la jonction (la résistance carrée, la densité de courant de saturation et le rendement d'émetteur)

Il faut donc faire un compromis dans le choix de l'épaisseur de l'émetteur : Pas trop mince pour avoir un champ électrique suffisant au niveau de la jonction p+, et pas trop épaisse, afin qu'un maximum de photons soient transmis dans la base cristalline, et que la longueur de diffusion des porteurs de charge soit au moins égale à l'épaisseur de l'émetteur.

Conclusion

générale

Conclusion générale :

Le dopage au Bore est l'une des principales solutions technologiques pour atteindre l'émetteur p+ pour les cellules à base de Silicium de type n. De nombreuses études ont déjà démontré sa capacité à former une jonction permettant d'obtenir l'effet photo-électrique quelle que soit la structure de la cellule photovoltaïque choisie. Actuellement la demande d'un procédé de dopage Bore est en pleine croissance avec l'émergence de la fabrication des cellules sur Silicium de type n.

Le Silicium de type n, reste encore peu utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques proposées sur le marché. Il ne représente que 5% du marché actuel mais sa marge de progression reste encore importante aux vues des qualités qu'on lui prête. Le développement de nouveaux outils de production permettra à l'avenir d'accroître les parts de marché ce type de cellules photovoltaïques.

Dans ce travail nous avons utilisé la simulation numérique pour l'étude des paramètres électriques et technologiques qui influent sur les cellules photovoltaïques à base de Silicium type n réalisée par diffusion thermique. La simulation a été faite par les logiciel EDNA 2 (PV Lighthouse). Et pour se faire, nous présentons ce travail de la façon suivante :

- Dans le premier chapitre, nous décrivons les notions fondamentales sur les technologies des cellules solaires, le fonctionnement des cellules solaires élémentaires et leurs caractéristiques principales, nous abordons ensuite des notions sur les semi-conducteurs, la jonction P-N, et la production d'un module photovoltaïque.
- Au cours du deuxième chapitre, l'étude était portée sur la diffusion du Bore dans le Silicium afin de pouvoir former un émetteur p+, les différents types de recombinaisons dans la jonction P-N et les technologies pour la réduction des pertes optiques.
- Dans le chapitre suivant, nous exposons le logiciel de simulation EDNA 2, Nous utilisons la simulation numérique à une dimension (PC1D) pour mettre en évidence les paramètres prépondérants pour l'obtention des résultats appréciables pour les cellules solaires à émetteurs p+ réalisés par diffusion thermique.
- Et pour finir nous avons effectué une série de simulation a une concentration initiale constante pour différentes doses à une température de 300 K.

Nous avons évalué au premier temps, la résistance carrée R_s , ensuite la densité de courant de saturation J_0 , ainsi que rendement de collecte en court-circuit I_{QE_E} en variant le pic de concentration Z_p et le facteur de profondeur Z_f pour chaque valeur de concentration.

Les résultats trouvés ont montré que :

L'évolution des paramètres électriques de jonctions P+ (émetteur) est liée à la concentration du dopant (Bore) et de l'épaisseur de la jonction. Très peu d'études de ce type ont été réalisées à ce jour, nous avons observé l'effet bénéfique de la diffusion au Bore du point de vue de la concentration. En effet, les fortes doses ont un impact sur les paramètres mesurés.

Les simulations que nous avons réalisées nous ont montré que pour une épaisseur la jonction (p+) de $0,26 \mu\text{m}$ permet d'atteindre les meilleures valeurs des paramètres photovoltaïque de la cellule.

Nous pensons que l'intérêt de ces résultats, qui restent encore susceptibles à d'autres améliorations permet d'avoir beaucoup d'incidences technologiques en photovoltaïque et surtout dans le processus de réalisation des jonctions/émetteurs très courtes hautement contrôlées.

Références bibliographiques

- [1] A. AZIZ, « Propriétés Electriques des Composants Electroniques Minéraux et Organiques, Conception et Modélisation d'une Chaîne Photovoltaïque Pour une Meilleure Exploitation de l'Energie Solaire », Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, 2006
- [2] T.Taima, S.Toyoshima, K.Hara, K.Yase « Control of measurement environment for high-efficiency organic photovoltaic cells » Japanese Journal of applied physics vol . 45 n° 8-2006
- [3] F. Lasnier, T.G. Ang, "Photovoltaic Engineering Handbook" IOP Publishing Ltd. ISBN 0-85274-311-4, 1980
- [4] J-F. GUILLEMOLES, « Chimie et photovoltaïque : d'Edmond Becquerel à nos jours, un parcours radieux »,
- [5] S. Motahhir, A. El Ghzizal, and A. Derouich, "Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM," pp. 301–306, 2015
doi: 10.31219/osf.io/wth8y
- [6] Z. Said-bacar, "Elaboration et caractérisations de Silicium polycristallin par cristallisation en phase liquide du Silicium amorphe" Thèse de doctorat, Université ParisSud, 2012
- [7] P. Viktorovitch, D. Jousse, A. Chenevas-Paule, L. Vieux-Rochas. « Diodes Schottky et MIS tunnel sur Silicium amorphe Hydrogéné de qualité photovoltaïque préparé par pulvérisation cathodique Caractérisation électrique par mesures capacitives ». Revue de Physique Appliquée, 14 (1), pp.201-208, 1979
- [8] F.Rebib. « Etude structurale, optique et électrique de couches minces d'oxy-nitride de Silicium déposé par pulvérisation cathodique radiofréquence réactive ». Chimie analytique. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2006
- [9] Jean-Éric Bourée et Pere Roca i Cabarrocas. « Cellules solaires en couches minces à base de Silicium ». Reflets de la physique n°6. 12-15. 2007
- [10] J.Ramanujam, D.M.Bishop, T.K. Todorov, O.Gunawan, J.Rath, R.Nekovei, E.Artegianni, A.Romeo, « Flexible CIGS, CdTe and a-Si:H based thin film solar cells ». Progress in Materials Science. 110. 2020
- [11] D. Hatem, F. Nemmar et M.S. Belkaid. « Cellules solaires organiques : choix des matériaux, structures des dispositifs et amélioration du rendement et de la stabilité ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 12 N°1. 77 – 86. 2009
- [12] B.Flèche, D. Delagnes, « energie solaire photovoltaïque », STI ELT, juin 2007

- [13] fr.made-in-china.com
- [14] F. Khelifaoui and M. Remram, "Fonctionnement à Haute Température d'une Cellule Solaire à Base du Silicium Polycristallin," *Sci. York*, pp. 83–89, 2000
- [15] D.Lincot, S.Collin, J.Even, J.Kleider. « Silicium, couches minces, pérovskites, photonique : de nouvelles avancées de la recherche sur les cellules photovoltaïques ». *Photoniques*. Vol 78. 23-27. 2015
- [16] E. Bruhat, "Développement de cellules photovoltaïques Silicium à homojonction industrialisables à contacts passivés To cite this version: HAL Id: tel-02902091 Développement de cellules photovoltaïques Silicium à homojonction industrialisables à contacts passivés", 2020
- [17] W.C. Benmoussa, S. Amara, A. Zerga. « Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au Silicium monocristallin ». *Revue des Energies Renouvelables ICRES-07 Tlemcen*. 301 – 306. 2007
- [18] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/semiconducteurs/>
- [19] J. Lavery, "Quantum tunneling model of a P-N junction in silvaco", Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2008
- [20] S. Daniel, "Modeling radiation effect on a triple junction solar cell using silvaco atlas", Thesis Naval postgraduate school Monterey California. 2012
- [21] G. Keil, M. Le Métayer, A. Cuquel, D. Le Pollotec, "Etude du dopage de l'Arséniure de Gallium par la technique d'épitaxie en phase vapeur aux organométalliques", 405-413, 1982
- [22] BARBOT.A, "Dopage par co-sublimation de semi-conducteurs organiques pour la conversion en énergie ; applications aux cellules photovoltaïques", Thèse de doctorat, Université de Limoges, 2014
- [23] www.optique-ingenieur.org
- [24] M.Bernard, "Recombinaison sur les Pièges à deux Niveaux dans les Semi-Conducteurs. *Journal of Electronics and Control*, 5(1), 15–18, 1958
- [25] U. B. Mokhtar, "Étude et mise au point d'une technique d'élaboration du composé CuInGaSe₂ pour le déposer en couche absorbante dans la fabrication des cellules solaires. *Faculté des Sciences*," 2008
- [26] <http://www.electronique-et-informatique.fr/>

- [27] C.Trassy. « La métallurgie du Silicium solaire ». Reflets de la Physique n°5. 13-15. 2007
- [28] L. T. Canham. Diffusion of li in Si. Pages 455–457. 1987
- [29] <https://ecoinfo.cnrs.fr/2010/10/20/le-Silicium-la-fabrication/>
- [30] G. Nouet, P. Lay, J. L. Chermant. « Le Silicium polycristallin Polix : élaboration, propriétés et performances ». Revue De Physique Appliquée. - T. 22, N°7, JUILLET 1987
- [31] S. WÜRZNER, M. HERMS, T. KADEN, H. MÖLLER, M. WAGNER, Characterization of the diamond wire sawing process for monocrystalline silicon by Raman spectroscopy and SIREX polarimetry, *Energies*, 414, 1-2, 2017
DOI : 10.3390/en10040414
- [32] A. Mouhoub. « Procédés Technologiques Alternatifs de Réalisation des Photopiles Solaires au Silicium Cristallin ». Rev. Energ. Ren. Vol. 4. 2001
- [33] K. Hamouda, A. Tkouti, M.D. Mouss, C. Hamouda, A. Malek. « Analyse technique et économique de recyclage des modules photovoltaïques ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°2. 331 – 350. 2012
- [34] S. Kudo, Y. Hirose, T. Futase, Y. Ogawa, T. Yamaguchi, K. Kihara, K. Kashihara, N. Murata, T. Katayama, K. Asayama et E. Murakami (2005). IEEE-47th Annual International Reliability Physics Symposium, 311-316, Montreal
- [35] www.researchgate.net
- [36] H. Nodet, D. Casenave, R. Gauthier, and P. Pinard, “Méthode de mesure de la longueur de diffusion dans des rubans de Silicium polycristallin destinés à la conversion photovoltaïque,” *Rev. Phys. Appliquée*, vol. 16, no. 10, pp. 591–595, 1981
Doi : 10.1051/rphysap:019810016010059100
- [37] S. M. Sze. *Semiconductor Devices Physics and Technology*. Wiley, 2002
- [38] N.Dupuis. "Calcul du coefficient de diffusion par la théorie cinétique des gaz." Intégration par épitaxie sélective d'un Modulateur Electro-Absorbant et d'un Amplificateur Optique à base de puits quantiques AlGaInAs: 190, 2008
- [39] P.Guiraldenq," Diffusion dans les métaux", Technique de l'ingénieur, 1994
- [40] A.BEREZINE, O. MOTCHALKINA," technologie et construction des circuits intégrés", Edition MIR, Moscou, 1983

- [41] A. Das, development of high-efficiency boron diffused silicon solar cells, georgia, 2012
- [42] H. Lachachi, étude de la diffusion du Bore et de la passivation des défauts dans les cellules solaires au Silicium type n à haut rendement, Tlemcen, 2018
- [43] C.Gontrand, Composants en micro-nanoélectronique: modélisation des processus de diffusion et du fonctionnement. ISTE Group, 2018
- [44] N. RODRIGUEZ, “Diffusion Des Dopants Dans Les Dispositifs De La Microelectronique : Co-Diffusion De L’Arsenic Et Du Phosphore Dans Le Silicium Monocristallin, Etudes Unidimensionnelle Et Bidimensionnelle.” 2008.
- [45] M. E. Fogarassy et al., “École Doctorale Mathématiques , Sciences de l’ Information et de l’ Ingénieur Docteur de l’ Université Louis Pasteur – Strasbourg I Discipline : Sciences pour l’ Ingénieur Stéphane COUTANSON Étude Du Dopage Laser En Phases Solide Et Liquide : Applicat,” Sci. York, 2008.
- [46] A. FICK, « Über Diffusion », Annalen der Physik und Chemie, vol. 94, 1855, p. 59–86
- [47] T. Désoyer, A. Sur, and D. FICK, “(Article) Sur la première loi de FICK et les équations d’ équilibre quasi-statique gouvernant la diffusion moléculaire, 2009
- [48] B. Bazer-Bachi, “Développement et mise au point d’un procédé innovant de diffusion des dopants N et P pour la fabrication de cellules photovoltaïques Silicium,” 2010
- [49] A. SOUIGAT, K. AIADI, “Modélisation et simulation de l’architecture, de la croissance ‘ ,” pp. 133–135 Vol. 7, N° 2, 2015
- [50] H.Abouatia, ‘Existence globale de la solution d’un système de réaction-diffusion via Lyapunov’ Mémoire de Magister, Université de Guelma, 2011
- [51] F. Boucard, Modélisation de la diffusion des dopants dans le Silicium pour la réalisation de jonctions fines, Université Louis Pasteur : PhD, 2003
- [52] S. Solmi, E. Landi et F. Bruffaldi, «High-Concentration Boron Diffusion in Silicon: Simulation of the Precipitation Phenomena» Journal of Applied Physics, vol. 68, n° 17, p. 3250, 1990
- [53] R. Lançon, Y. Marfaing. Mécanisme de génération-recombinaison dans les jonctions p-n de Tellure de Cadmium. Journal de Physique, 30 (1), pp.97-102, 1969
- [54] M.Bernard, Recombinaison sur les Pièges à deux Niveaux dans les Semi-Conducteurs. Journal of Electronics and Control, 5(1), 15–18, 1958

- [55] Boulitrop, F., and A. Chenevas-Paule. "recombinaison radiative et effets de spin dans le Silicium microcristallin post-hydrogene plasma." *Le Journal de Physique Colloques* 43.C1: C1-153, 1982
- [56] Strikha, M. V. "Recombinaison Auger sur les impuretés dans le Silicium." *Fizika i tehnika poluprovodnikov* 19.4, 697-702, 1985
- [57] h. Hasni, Caractérisation Automatisée d'une cellule solaire, Mémoire de master, Université Med Khider Biskra, 2014.
- [58] SHOCKLEY W. and READ W.T. Jr. Statistics of the Recombinations of Holes and Electron. *Physical Review*, 1952, vol. 87, n° 5, pp. 835–842
- [59] HALL R.N. Electron-Hole Recombination in Germanium. *Physical Review*, 1952, vol. 87, n° 2, p. 387..
- [60] [KERR Mark John. Surface, emitter and bulk recombination in silicon and development of silicon nitride passivated solar cells [en ligne]. Thèse. Canberra, Australie : The Australian National University, 2002, 228p.
- [61] B. A. Mourad, "Simulation et Optimisation d'une Cellule Solaire à base de Cu (In,Ga)Se₂, Université Ahmed Draïa Adrar " 2018.
- [62] GREEN M.A. 'Silicon Solar Cells', *Advanced Principles and Practice*. Sydney, Australia : Centre for photovoltaic devices and systems, UNSW, 366 p, 1995
- [63] RICAUD A. *Photopiles solaires*. Lausanne, Suisse : Presse polytechniques et universitaires romandes, 332 p, 1997
- [64] PAPET P. « Nouveaux concepts pour la réalisation de cellules photovoltaïques à contacts interdigités sur substrats minces en Silicium cristallin », Thèse EEA. Lyon : INL - INSA de Lyon, 157 p, 2007
- [65] D. E. N. Sciences, "Elaboration, Modélisation et Caractérisation des Cellules Solaires de type IIIème Génération dotées de Couches Antireflets à Indice Graduel," 2016
- [66] S. Martinuzzi, "Les cellules solaires au Silicium cristallin," *Reflets la Phys.*, no. 5, pp. 8–12, 2007, doi: 10.1051/refdp/2007059
- [67] C. Pere, "Cellules solaires photovoltaïques : un condensé d'optique et d'électronique," pp. 34–37, 2012
- [68] D. Chapin, C. Fuller et G. Pearson, « A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power », *Journal of Applied Physics*, vol. 25, p. 676, 1954

- [69] Etude de la diffusion du Bore et de la passivation des défauts dans les cellules solaires au Silicium type N à haut rendement, "Thèse lmd," 2018
- [70] <https://www2.pvlighthouse.com.au/>
- [71] K.R. McIntosh and P.P. Altermatt, "A freeware 1D emitter model for silicon solar cells," 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, pp. 2188–2193, 2010
- [72] K.R. McIntosh, P.P. Altermatt, T.J. Ratcliff, K.C. Fong, L.E. Black, S.C. Baker-Finch and M.D. Abbott, "An examination of three common assumptions used to simulate recombination in heavily doped silicon," Proc. 28th European Photovoltaic Science and Engineering Conference, Paris, pp. 1672–1679, 2013