

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique
Université Mohammed Seddik Ben Yahia Jijel



Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Électronique

Filière : Électronique

Spécialité : Microélectronique

Mémoire de fin d'études de Master

Étude d'une cellule photovoltaïque en
hétérojonction en silicium nanocristallin

Travail encadré par :

- Pr. BOURIDAH Hachemi
- Dr. HAOUES Hakim

Réalisé par :

- TENNOUNE Moïse-Eddine
- MAHRANE Amine

Année universitaire 2020/2021

REMERCIEMENTS

Nous remercions Dieu, Tout-Puissant, Omniscient, qui sait combien il nous arrive de douter, mais qui ne nous a jamais privé de sa bienveillance et nous a toujours guidé dans la voie de l'accomplissement.

Nous remercions le professeur BOURIDAH Hachemi pour avoir encadré ce travail et pour ses enseignements, mais nous ne saurons être assez reconnaissants pour ses encouragements et ses certitudes quant à nos aptitudes.

Je tiens à remercier aussi notre Co encadreur : docteur HAOUES Hakim pour son orientation, ses conseils avisés et sa disponibilité.

Je tiens également à remercier Mr. Mahmoud Riad BEGHOUL et Mr. Karim KEMIH pour m'avoir fait l'honneur d'être les membres du jury lors de ma présentation.

C'est une reconnaissance éternelle qu'on adresse à nos parents, sans qui, rien n'aurait été possible. On exprime aussi notre gratitude à toute personne nous ayant, de près ou de loin, aidé à accomplir ce travail et ayant participé à faire de ces deux dernières années d'agréables moments.

DÉDICACES

C'est tout naturellement que je dédie le fruit de mes années d'études à mon père et à ma mère, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices constants pour voir ce jour arriver. Puissent-ils vivre longtemps, heureux et en bonne santé.

Je souhaite aussi dédier cette contribution infiniment modeste à mon frère Mounir, à ma sœur Maïssa, à ma grand-mère et à mon oncle Samir.

À tous mes amis, compagnons de tout temps, des jours heureux comme des heures pénibles, je dédie mes efforts, comme ils ont su me dédier leur soutien et leur patience.

Ce mémoire se veut aussi un hommage à tous mes proches, à toute ma famille et toute personne que je n'ai pas pu citer.

TENNOUNE Moïse-Eddine

DÉDICACES

C'est tout naturellement que je dédie le fruit de mes années d'études à mon père Kheireddine et à ma mère Nassiha, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices constants pour voir ce jour arriver. Puissent-ils vivre longtemps, heureux et en bonne santé.

Je souhaite aussi dédier cette contribution infiniment modeste à mon frère Mohamed, à ma sœur Imene et à ma grand-mère Houria. Puisse Dieu le Tout-Puissant les préserver.

À tous mes amis proches, compagnons de tout temps, des jours heureux comme des heures pénibles, je dédie mes efforts, comme ils ont su me dédier leur soutien et leur patience.

Ce mémoire se veut aussi un hommage à toutes les personnes que je n'ai pas pu citer.

MAHRANE Amine

STE DES TABLEAUX

Tableau III.1 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 6nm et d'un dopage de 10^{17} cm^{-3})

.....
37

Tableau III.2 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 6nm et d'un dopage de 10^{18} cm^{-3})

.....
38

Tableau III.3 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 6nm et d'un dopage de 10^{19} cm^{-3})

.....
39

Tableau III.4 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 6nm et d'un dopage de 10^{20} cm^{-3})

.....
40

Tableau III.5 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 4nm et d'un dopage de 10^{17} cm^{-3})

.....
43

Tableau III.6 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 4nm et d'un dopage de 10^{18} cm^{-3})

.....
44

Tableau III.7 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 4nm et d'un dopage de 10^{19} cm^{-3})

.....
45

Tableau III.8 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 4nm et d'un dopage de 10^{20} cm^{-3})

.....
46

Tableau III.9 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 2nm et d'un dopage de 10^{17} cm^{-3})

.....
48

Tableau III.10 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 2nm et d'un dopage de 10^{18}cm^{-3})	49
Tableau III.11 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 2nm et d'un dopage de 10^{19}cm^{-3})	50
Tableau III.12 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 2nm et d'un dopage de 10^{20}cm^{-3})	51

LISTES DES FIGURES

Figure I.1 Répartition des spectres du rayonnement solaire	5
Figure I.2 Mise en contact des deux semi-conducteurs dopés Et Migration des porteurs sous l'effet de gradient de charge	7
Figure I.3 Création de la barrière de potentiel au niveau de la zone de contact	8
Figure I.4 Principe de l'effet photovoltaïque	9
Figure I.5 Caractéristique courant-tension d'une cellule PV a) obscurité b) sous éclairement	10
Figure II.1 Explication de l'équation de continuité dans la conversion photovoltaïque.....	22
Figure II.2. Structure d'une cellule photovoltaïque et ses paramètres.....	25
Figure II.3. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque à jonction pn.....	27
..	
Figure III.1 Caractéristique courant-tension et courbe de puissance	37
Figure III.2. Caractéristique courant-tension et courbe de puissance	38
Figure III.3. Caractéristique courant-tension et courbe de puissance	39
Figure III.4. Caractéristique courant-tension et courbe de puissance	40
Figure III.5. Caractéristique courant-tension et courbe de puissance	43
Figure III.6. Caractéristique courant-tension et courbe de puissance	44
Figure III.7. Caractéristique courant-tension et courbe de puissance	45
Figure III.8. Caractéristique courant-tension et courbe de puissance	46
Figure III.9. Caractéristique courant-tension et courbe de puissance	49

Figure III.10. Caractéristique courant-tension et courbe de puissance	50
Figure III.11. Caractéristique courant-tension et courbe de puissance	51
Figure III.12. Caractéristique courant-tension et courbe de puissance	52
Figure III.13 La variation du rendement en fonction des concentrations de dopage	52
Figure III.14 La variation du rendement en fonction des concentrations de dopage pour les différentes tailles des nanocrystallites.....	53

TABLE DES MATIÈRES

<i>LISTE DES TABLEAUX</i>	<i>I</i>
<i>LISTES DES FIGURES</i>	<i>II</i>
<i>INTRODUCTION GÉNÉRALE</i>	<i>1</i>
<i>CHAPITRE I : NOTIONS FONDAMENTALES SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE</i>	<i>3</i>
<i>Introduction</i>	<i>4</i>
<i>1. Notions générales sur le rayonnement solaire</i>	<i>4</i>
1.1. Rayonnement solaire	<i>4</i>
1.2. Notion Air masse	<i>5</i>
<i>2. Notions sur la cellule solaire</i>	<i>6</i>
<i>3. Les semiconducteurs</i>	<i>6</i>
• Énergie de gap	<i>6</i>
• Dopage des semi-conducteurs.....	<i>6</i>
<i>4. La jonction PN</i>	<i>7</i>
<i>5. L'effet Photovoltaïque</i>	<i>8</i>
<i>6. Paramètres de la cellule photovoltaïque idéale</i>	<i>10</i>
6.1. Expression du courant et caractéristique courant-tension	<i>10</i>
6.2. Courant de court-circuit	<i>11</i>
6.3. Tension de circuit ouvert	<i>11</i>
6.4. Puissance d'une cellule photovoltaïque	<i>12</i>
6.5. Facteur de forme	<i>12</i>
6.6. Rendement d'une cellule photovoltaïque	<i>13</i>
6.7. Rendement quantiques EQE.....	<i>13</i>
<i>7. Cellules photovoltaïques en hétérojonction</i>	<i>14</i>
<i>8. Les nanostructures de silicium pour le photovoltaïque</i>	<i>15</i>
8.1. Le Silicium nano cristallin	<i>15</i>
8.2. Méthode de nanostructuration par approche (bottom-up).....	<i>15</i>
8.3. Applications du Silicium nanocristallin	<i>15</i>
<i>9. Différentes générations de cellules photovoltaïques</i>	<i>16</i>

9. 1. Cellules de première génération	16
9. 2. Cellules de deuxième génération	17
9. 3. Cellules de troisième génération	17
<i>Conclusion</i>	18
CHAPITRE II : MODÉLE ANALYTIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES	19
<i>Introduction</i>	20
1. Cellules photovoltaïques en homojonction PN tout en silicium	20
1. 1. Équations fondamentales dans les semiconducteurs	20
1.1.1. Équation de Poisson.....	20
1.1.2. Équation de continuité.....	21
1.1.3. Équation de transport	22
1.1.4. Expressions des densités n et p.....	22
1.1.5. Expressions des coefficients de diffusion	23
1.1.6. Expressions de la permittivité.....	23
1.1.7. Expression de la concentration intrinsèque.....	24
1.1.8. Expression de l'indice de réfraction	24
1.1.9. Exemple d'une structure typique d'une jonction PN.....	24
2. Cellules photovoltaïques en hétérojonction avec une couche de silicium nanocristalline	30
2.1. Rayon de Bohr	30
2.2. Confinement quantique	31
2.3. Permittivité diélectrique	32
2.4. Coefficient d'absorption.....	32
<i>Conclusion</i>	33
CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D	19
<i>Introduction</i>	335
1. Simulation d'une cellule photovoltaïque par le logiciel PC1D.....	35
1.1 Présentation du logiciel PC1D.....	35

1.2. Cas d'une cellule photovoltaïque avec une taille moyenne des nanocristaux de 6 nm.

355

1.2. 1. Énergie de gap	36
1.2. 2. Concentration intrinsèque.....	36
1.2. 3. Permittivité relative	36
1.2. 4. Indice de réfraction	366
1.2. 5. Simulation et interprétation des résultats.....	37
A. Premier cas de dopage	37
B. Deuxième cas de dopage	38
C. Troisième cas de dopage.....	39
D. Quatrième cas de dopage	40

1.3. Cas d'une cellule photovoltaïque avec une taille moyenne des nanocristaux de 4 nm

411

1.3. 1. Énergie de gap	41
1.3. 2. Concentration intrinsèque.....	42
1.3. 3. Permittivité relative	422
1.3. 4. Indice de réfraction	422
1.3. 5. Simulation et interprétation des résultats.....	43
A. Premier cas de dopage	43
B. Deuxième cas de dopage	44
C. Troisième cas de dopage.....	45
D. Quatrième cas de dopage	46

1.4. Cas d'une cellule photovoltaïque avec une taille moyenne des nanocristaux de 2 nm ..47

1.4. 1. Énergie de gap	47
1.4. 2. Concentration intrinsèque.....	47
1.4. 3. Permittivité relative	48
1.4. 4. Indice de réfraction	48
1.4. 5. Simulation et interprétation des résultats.....	48
A. Premier cas de dopage	48
B. Deuxième cas de dopage	49
C. Troisième cas de dopage.....	500
D. Quatrième cas de dopage	511

1.5. Étude comparative des résultats de simulation 522

Conclusion 533

CONCLUSION GÉNÉRALE 544

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 55

Résumé

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Actuellement, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre générant ainsi de la pollution. Un autre danger est qu'une grande consommation du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie pour les générations futures. Par opposition, une énergie renouvelable se régénère naturellement et indéfiniment. En effet, l'énergie issue du soleil répond actuellement aux critères d'abondance et de régénération infinie. Elle peut ainsi être utilisée directement sous forme thermique et depuis la découverte de l'effet photovoltaïque, convertie en énergie électrique. Cette dernière, bien qu'elle soit connue depuis de nombreuses années, comme source pouvant produire de l'énergie allant de quelques milliwatts au mégawatt, reste à un stade anecdotique et ne se développe pas encore dans de grandes proportions, notamment à cause du coût trop élevé des capteurs mis en œuvre [1].

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839. Cette conversion d'énergie peut s'effectuer par le biais d'un capteur constitué de matériaux sensibles à l'énergie contenue dans les photons. Ce capteur se présente à l'échelle élémentaire sous forme d'une cellule nommée cellule photovoltaïque (PV). La quantité d'énergie électrique ainsi générée peut varier en fonction du matériau utilisé, des paramètres géométriques du capteur et de sa capacité à collecter les électrons avant qu'ils ne se recombinent dans le matériau. L'association possible de plusieurs cellules PV en série/parallèle d'ajuster la production d'énergie photovoltaïque. Ces associations constituent un générateur photovoltaïque (GPV) avec des caractéristiques courant-tension $I(V)$ spécifiques, non-linéaires et présentant des points de puissance maximale (PPM) dépendant du niveau d'éclairement, de la température de la cellule ainsi que de la durée de vie de l'ensemble [2].

La cellule solaire est composée de matériaux semiconducteurs qui nécessitent plusieurs études et comparaisons. Plusieurs types de cellules ont été présentés dans la littérature pour étudier le rendement et déterminer leurs caractéristiques en particulier la caractéristique courant-tension et la caractéristique puissance - tension. Parmi les différents types de cellules photovoltaïques les plus répondues sont les cellules en silicium (Si) sous ses multitudes morphologies allant du silicium monocristallin au silicium nanocristallin.

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude par utilisation du logiciel PC1D d'une cellule photovoltaïque en hétérojonction avec une couche nanocristalline de silicium déposée

sur un substrat du silicium monocristallin. L'étude sera menée en fonction du taux de dopage de la couche ainsi que de la taille des nanocristallines de la couche en question. Pour se faire le manuscrit est organisé de la façon suivante :

Dans le premier chapitre nous présentons des généralités sur le photovoltaïque ainsi que des notions fondamentales sur les cellules photovoltaïques.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation analytique des cellules photovoltaïques. Nous explicitons les différentes équations que supportent les modèles relatifs à une cellule en homojonction et une cellule en hétérojonction avec une couche de silicium nanocristallin.

Le troisième chapitre est axé sur la simulation d'une cellule photovoltaïque en hétérojonction à l'aide du logiciel de simulation PC1D en fonction des taux de dopage et de la taille moyenne des nanocristallines de silicium. Nous réaliserons ensuite une étude comparative des rendements, des facteurs de forme et des puissances maximales de ces cellules dans le but d'optimiser les paramètres physiques permettant le meilleur rendement.

On terminera notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I : NOTIONS FONDAMENTALES SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

Introduction :

Ce chapitre est axé sur les notions générales relatives au photovoltaïque. Nous exposons les aspects physiques et expérimentaux des cellules photovoltaïques à base de matériaux semi-conducteurs. Les différentes générations de cellules solaires ont fait aussi l'objet de ce chapitre.

1. Notions générales sur le rayonnement solaire :

1.1. Rayonnement solaire :

Pour développer, optimiser puis caractériser une cellule solaire, une bonne connaissance de la source d'énergie reçue par cette dernière s'impose. Pour le cas du soleil, dont sa surface se comporte tel qu'un corps noir à une température autour de 5777 °K , la quantité d'énergie solaire moyenne dans l'année, qui atteint l'atmosphère est d'environ 1360 w/m^2 en tenant compte de la surface du soleil et de la distance entre le soleil et la terre [3]. Cette énergie solaire peut être absorbée partiellement par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau, ce qui nous permet de constater que ce flux d'énergie dépend en particulier de l'épaisseur atmosphérique traversée.

On note que le spectre solaire varie entre 200 et 3000 nm au sommet de l'atmosphère et que l'énergie reçue se répartit comme suit :

- 9% dans la bande des Ultraviolets ($<0.4 \text{ }\mu\text{m}$) ;
- 43% dans la bande du visible ($0.4 \text{ à } 0.8 \text{ }\mu\text{m}$) ;
- 48% dans la bande de l'infrarouge ($0.7 \text{ à } 3 \text{ }\mu\text{m}$).

Notons que 98.8 % de l'énergie du spectre solaire est contenu dans la bande des longueurs d'ondes inférieures à 2500 nm [3].

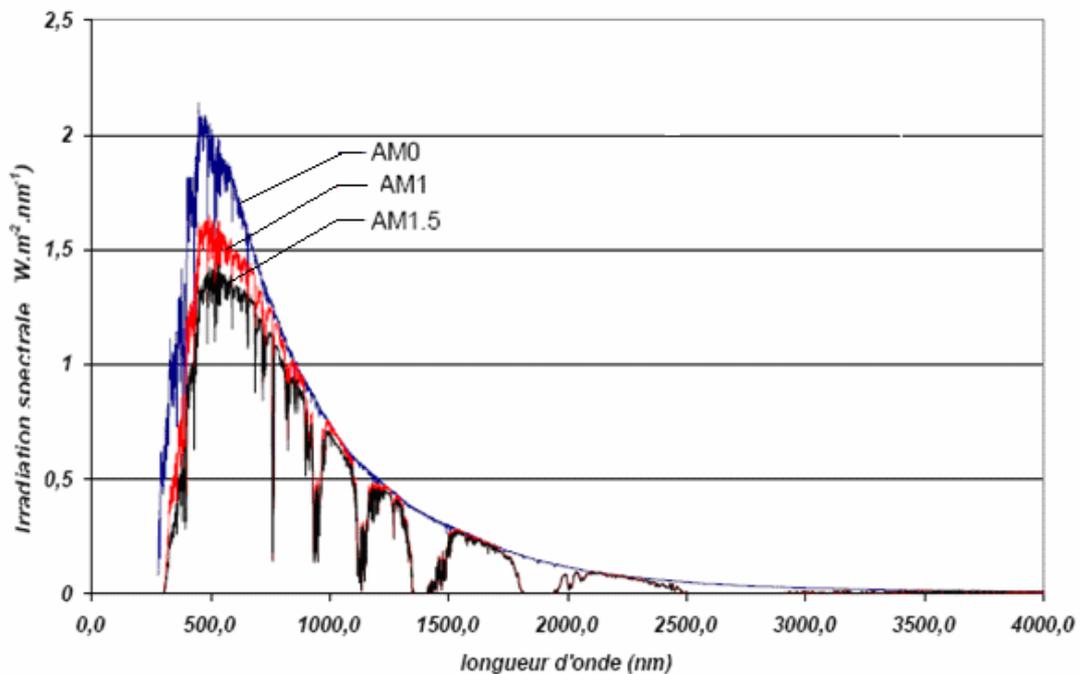


Figure I.1 : Répartition des spectres du rayonnement solaire [3]

1.2. Notion Air masse :

On définit la notion Air masse par la distance que traverse le rayonnement solaire pour atteindre son point d'impact. L'expression simplifiée peut s'écrire comme :

$$AM = 1/\sin x \quad (I.1)$$

x : l'élévation du soleil sur l'horizon (90° au zénith)

Dans les conditions normales et au niveau de la mer.

On définit :

- AM 0 : Rayonnement hors atmosphère ;
- AM 1 : Rayonnement avec un angle de 90° sur la surface de la terre (zénith) ;
- AM 1.5 : Rayonnement avec un angle de 48.2° sur la surface de la terre ;

- AM 2 : Rayonnement avec un angle de 30° sur la surface de la terre.

2. Notions sur la cellule solaire :

La cellule solaire est l'élément de base dans la conversion photovoltaïque, elle est fabriquée à partir de matériaux semiconducteurs qui convertissent l'énergie lumineuse émise par le soleil en courant électrique par effet photovoltaïque.

3. Les semiconducteurs :

Un semi-conducteur est un matériau dont la conductivité est entre un métal et un isolant. Le nombre de charges libres (électrons) dans un semi-conducteur est faible comparant aux métaux. Pour améliorer la conductivité d'un semiconducteur, il faut créer plus d'électrons libres dans le matériau et pour cela il faut donner de l'énergie à ce dernier pour que les électrons liés au matériau (Bande de Valence) puissent atteindre la bande d'énergie supérieur (bande de conduction) et devenir libre. Cette énergie donnée doit être supérieure à l'énergie de gap E_g de ce matériau.

3-a- Énergie de gap :

L'énergie du gap E_g ou la bande interdite d'énergie est la valeur de l'écart entre deux niveaux d'énergie : le niveau d'énergie de la bande de conduction E_c et le niveau d'énergie de la bande de valence E_v . Elle est exprimée en électronvolts (eV).

$$E_g = E_c - E_v \quad (I.2)$$

L'énergie de gap E_g est une constante du semiconducteur, par exemple la valeur du gap du silicium cristallin est de 1.12 eV et celle du silicium amorphe est de 1.7 eV.

3-b- Dopage des semi-conducteurs :

Le dopage des semiconducteurs consiste à faire introduire des impuretés trivalentes (dopage de type p) ou pentavalentes (dopage de type n) dans le matériau intrinsèque afin de modifier ses propriétés électriques.

Dopage type n:

Pour doper un semiconducteur en type n il faut qu'on introduise dans la structure cristalline des atomes étrangers pentavalents (cinquième colonne du tableau périodique) qui ont la propriété de donateurs d'électrons. Les dopants usuels de type n sont le phosphore et l'arsenic.

Dopage type p :

Pour doper un semi-conducteur en type P il faut qu'on introduise dans la structure cristalline des atomes étrangers trivalents (troisième colonne du tableau périodique) qui ont la propriété de créer des trous (charges positives) dans la bande de valence du semiconducteur. Le dopant le plus utilisé dans ce cas est le bore.

4. La jonction PN :

Une Jonction PN est le résultat de la mise en contact de deux matériaux semiconducteurs dopés respectivement avec des impuretés de types donateurs et accepteurs (N, P) (Figure 2). Sous l'effet d'un gradient de charge, les électrons excédentaires de la zone N vont avoir tendance à migrer vers la zone P déficitaire en électrons et inversement pour les trous de la zone P (Figure 2). Certains de ces électrons vont donc rester du côté P et de même pour certains trous ayant migré du côté N. Il en résulte une recombinaison des charges au niveau de la zone de contact et la création d'une différence de potentiel locale au niveau de la zone de contact. C'est une barrière de potentiel. En effet, cette différence de potentiel ne permet plus la migration d'éventuels électrons libres de N vers la zone P et de trous de la zone P vers la zone N (Figure 3). Ils sont aux contraires repoussés vers les bords de leur zone d'appartenance. La jonction PN est ainsi réalisée [4].

CHAPITRE I : NOTIONS FONDAMENTALES SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

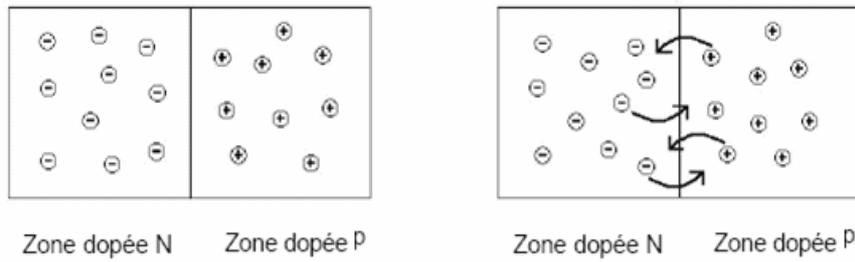


Figure I.2 : Mise en contact des deux semi-conducteurs dopés Et Migration des porteurs sous l'effet de gradient de charge [4]

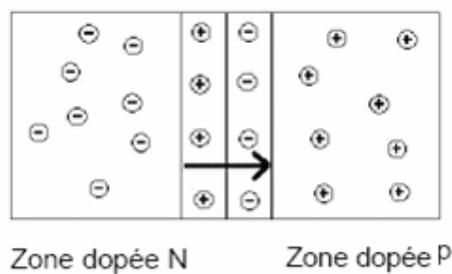


Figure I.3 : Création de la barrière de potentiel au niveau de la zone de contact [4]

5. L'effet Photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque repose principalement sur trois grands principes engendrant la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique à savoir :

- Absorption maximum de la lumière sur tout le spectre solaire.
- La création de paires électron-trou par photo excitation du semi-conducteur par rayon lumineux d'énergie supérieure à celle de la bande interdite.
- Séparation des charges et leurs collections.

Quand une jonction PN est éclairée par des photons d'énergie supérieure à la valeur du gap E_g , les électrons de la bande de valence du semiconducteur vont pouvoir passer dans la bande de conduction et devenir libres. Ce phénomène va engendrer au sein de la structure la création de paires électron-trou. Ces paires électron-trou sont séparées sous l'influence du champ électrique interne qui règne dans la zone de transition, dite de charge d'espace ZCE

CHAPITRE I : NOTIONS FONDAMENTALES SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

[5]. Les photons incidents créent des porteurs dans les zones N et P et la zone de charge d'espace. Les photoporteurs auront un comportement différent suivant la région [6].

- Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont balayés par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils seront majoritaires créant ainsi un photocourant de diffusion.
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron-trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique. Les électrons vont aller vers la région n et les trous vers la région p. On aura un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant noté I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse.

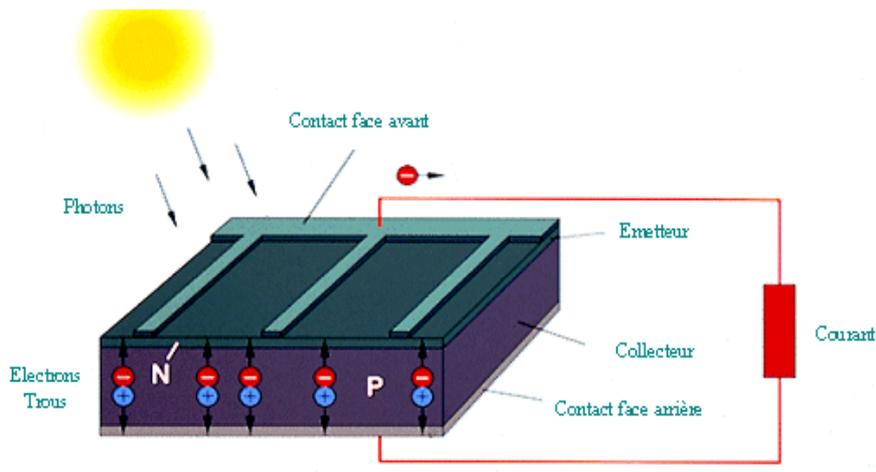


Figure I.4 : Principe de l'effet photovoltaïque [2]

On note plusieurs paramètres qui nous seront utiles pour caractériser les performances d'une cellule photovoltaïque et il est impératif de procéder à ces mesures dans les conditions de test standard (STD) suivantes :

- Un éclairement solaire égale à 1000 W/m^2 ;
- Une température constante de 25°C ;
- Un spectre lumineux qui ressemble au spectre AM1.5.

6. Paramètres de la cellule photovoltaïque idéale :

6.1. Expression du courant et caractéristique courant-tension :

Le courant délivré par une cellule photovoltaïque éclairée est noté :

$$I(V) = I_{ph} - I_d(V) \quad (I.3)$$

Avec:

- I_{ph} : Densité du photocourant et il est proportionnel à l'irradiance du rayonnement incident Φ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) et à la surface de la cellule S (m^2) [7] :

$$I_{ph} = \alpha(T) \cdot \Phi \cdot S \quad (I.4)$$

$\alpha(T)$: Coefficient d'absorption qui dépend faiblement de la température.

- $I_d(V)$: courant de la diode et dans le cas idéal est donné par l'équation de Shockley suivante :

$$I_d(V) = I_S \left(\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right) \quad (I.5)$$

On aura donc :

$$I(V) = I_{ph} - I_S \left[\exp\left(\frac{qV}{nKT}\right) - 1 \right] \quad (I.6)$$

- I_S : Courant de saturation
- q : Charge de l'électron
- K : Constante de Boltzman
- T : Temperature
- n : Facteur d'idéalité

On aura donc la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque à jonction PN comme suit :

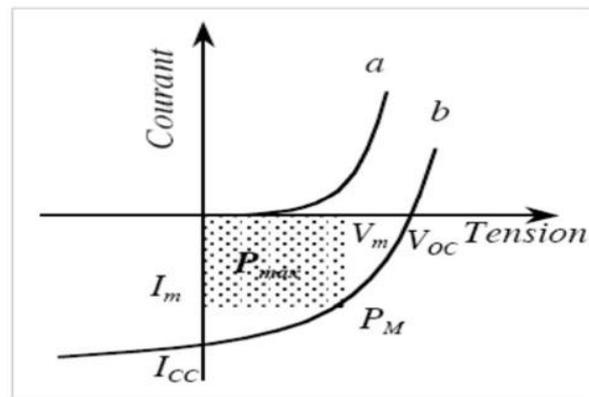


Figure I.5 : Caractéristique courant-tension d'une cellule PV

a) obscurité b) sous éclairage

6. 2. Courant de court-circuit :

On définit le courant court-circuit I_{cc} par le courant qui passe par la cellule photovoltaïque lorsque la tension est nulle V égale à 0, on peut bien l'apercevoir sur la caractéristique courant-tension $I(V)$ (Figure I.5)

Ce courant croit linéairement avec l'intensité d'illumination incidente et il dépend de :

- La mobilité des porteurs
- La surface éclairée
- La température
- La longueur d'onde du rayonnement

Dans le cas idéal I_{cc} est égale au photocourant I_{ph} .

6. 3. Tension de circuit ouvert :

La tension circuit ouvert est la tension maximale que peut fournir la cellule solaire. C'est la tension de la cellule lorsque le courant est nul, on peut aussi bien l'apercevoir sur la caractéristique courant - tension $I(V)$ (Figure I. 5). Cette tension dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît aussi avec la température et varie très peu avec l'intensité lumineuse. V_{oc} est donnée par la relation :

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \text{Log} \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (I.7)$$

6. 4. Puissance d'une cellule photovoltaïque :

La puissance électrique fournie par une cellule photovoltaïque est le produit du courant continu fourni I et de la tension continue V .

L'expression de la puissance est donnée :

$$P = V \cdot I \quad (\text{I.8})$$

Avec :

- P : Puissance aux bornes de la cellule en Watts
- V : Tension aux bornes de la cellule en Volts
- I : Courant qui circule dans la cellule en Ampères.

La puissance maximale P_m est le produit de la tension V_m et le courant I_m

L'expression de la puissance maximale est donnée :

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (\text{I.9})$$

6. 5. Facteur de forme :

C'est le rapport entre la puissance maximale et le produit du courant court-circuit et la tension de circuit ouvert. Il informe sur la surface effective de matériau capable de transformer les photons incidents en électrons par effet photoélectrique.

Plus la valeur du facteur de forme sera grande plus la conversion photoélectrique sera meilleure.

L'expression du facteur de forme est donnée [8.9]:

$$F_F = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (\text{I.10})$$

Avec :

P_m : Puissance maximale ;

V_{oc} : Tension circuit ouvert ;

I_{cc} : Courant court-circuit.

6. 6. Rendement d'une cellule photovoltaïque :

Le rendement d'une cellule photovoltaïque ou en d'autres mots le rendement de conversion en puissance est le rapport en la puissance maximale fournie par une cellule photovoltaïque et la puissance lumineuse incidente. L'expression du rendement est donnée [9]:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{lum}} \quad (I.11)$$

Avec :

η : Rendement de la cellule

P_m : Puissance maximale fournie par la cellule

P_{lum} : Puissance lumineuse incidente.

Remarque :

On sait que :

$$F_F = \frac{P_m}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (I.12)$$

Alors :

$$\eta = \frac{F_F \cdot V_{oc} \cdot I_{cc}}{P_{lum}} \quad (I.13)$$

Donc on peut améliorer ce rendement en augmentant le facteur de forme, la tension circuit ouvert et le courant de court-circuit.

6. 7. Rendement quantiques EQE :

C'est le rapport entre la densité d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents [10]. L'expression de ce rendement est donnée par :

$$EQE = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \cdot \frac{E_{ph}(\lambda)}{q} \quad (I.14)$$

On sait que :

$$E_{ph}(\lambda) = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (I.15)$$

On sait aussi que l'expression de la réponse spectrale est donnée :

$$SR(\lambda) = \frac{I_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \quad (I.16)$$

Alors on aura :

$$EQE = SR(\lambda) \frac{h \cdot c}{q \cdot \lambda} \quad (I.17)$$

Avec :

I_{cc} : Courant court-circuit

E_{ph} : Énergie du photon

φ : Flux lumineux incident

q : Charge de l'électron

c : Célérité

λ : Longueur d'onde

h : Constante de Planck

7. Cellules photovoltaïques en hétérojonction :

Les cellules photovoltaïques en hétérojonction est la mise en contact de deux matériaux semi-conducteurs différents contrairement aux cellules à homojonction (avec un même matériau).

De nos jours ce type de cellule est en croissance continue grâce aux différentes possibilités d'alliage de matériaux. L'avantage de ces cellules est une bonne réponse en cas de faible luminosité. En d'autres mots, la cellule en hétérojonction va être capable de continuer à produire un courant électrique même dans un temps nuageux ou en cas de brouillard. Ceci engendre une meilleure absorption du spectre solaire tout le long de la journée. Ainsi les cellules photovoltaïques en hétérojonctions présentent des rendements bien plus intéressants que ceux des cellules en homojonction, d'où l'effort que fournissent les chercheurs dans le développement des cellules photovoltaïques de cette technologie.

8. Les nanostructures de silicium pour le photovoltaïque :

8. 1. Le Silicium nanocristallin :

Le silicium nano cristallin ou autrement dit le silicium nano structuré a été découvert et produit par Arthur Uhlir aux laboratoires Bell en 1950 [11]. Ce Silicium de dimensions inférieur à 100 nm a des propriétés électriques, optiques, chimiques, mécaniques, magnétiques, et biologiques qui peuvent être modifiés en fonction de la taille du nanocristal. Le silicium nanocristallin est utilisé dans les cellules photovoltaïques grâce à ses propriétés électrique et optique qui offrant des meilleurs rendements.

8. 2. Méthode de nanostructuration par approche (bottom-up) :

Parmi les méthodes de nanostructuration de silicium on peut citer les suivantes :

- Implantation des matrices hôtes par ions de silicium suivi d'un recuit thermique [12].
- Dépôt chimique en phase vapeur de couches d'oxyde non-stœchiométrique SiO_x ($1 < x < 2$) ou des couches SiN_x suivi ou non d'un recuit thermique [13].
- Pulvérisation cathodique d'un substrat de silicium sous atmosphère oxydante pour former la couche de sub-oxyde suivi d'un recuit thermique [14].
- Ablation laser d'un substrat en silicium [15,16].
- Attaque d'un substrat de silicium par des impulsions électriques (procédé Sparc) [17].
- Dépôt des clusters de silicium par décomposition du silane (SiH_4) [18].
- Synthèse de nanostructures sous forme d'aérosol [19].
- Recristallisation des couches de silicium amorphe [20].
- Nanostructuration par microscopie à onde locale [21].

8. 3. Applications du Silicium nanocristallin :

Le Silicium nano cristallin est utilisé dans plusieurs domaines tels que la microélectronique, l'optoélectronique et le photovoltaïque.

Ce développement des nano structures a permis de développer de nouvelles technologies dans la microélectronique comme les transistors MOS (*Metal Oxide Semiconductor*) et améliorer ses fonctionnalités comme le transistor MOS à grille flottante.

CHAPITRE I : NOTIONS FONDAMENTALES SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

En optoélectronique les propriétés optiques des semi-conducteurs à gap indirect tel que le silicium à l'état massif ne sont pas intéressantes. Cependant la nanostructuration du silicium permet d'obtenir un gap pseudo direct dont la largeur dépend de la taille des nanocrystallites du silicium.

Dans le photovoltaïque, les cellules photovoltaïques (PV) absorbent des photons dont l'énergie est supérieure à leur gap optique pour créer des paires électron-trou. Ces paires sont séparées par le champ électrique créé par une jonction p-n dans la cellule, puis collectées par le circuit électrique externe, créant ainsi un courant électrique.

En utilisant le silicium nanocristallin, les énergies de bande interdite sont ajustables selon la taille des nanoparticules du silicium permettant de meilleurs rendements.

9. Différentes générations de cellules photovoltaïques :

Il existe trois technologies principales de cellules photovoltaïques. Toutes ces cellules sont des semi-conducteurs généralement à base de silicium, mais on trouve aussi d'autres à base de Tellure de Cadmium, d'autres sont à base de silicium amorphe ou cristallin.

9. 1. Cellules de première génération :

Ces cellules, généralement en silicium cristallin, ne comprennent qu'une seule jonction PN. La technique de fabrication de ces cellules, basée sur la production de "wafers" à partir d'un silicium très pur, reste très énergivore et coûteuse. La limite théorique de rendement de ce type de cellule est d'environ 27%.

Les cellules les plus récentes s'approchent chaque année de plus en plus de cette limite. On distingue deux types de cellules cristallines :

- Les cellules polycristallines :

Ces cellules sont constituées de matériaux avec des cristaux orientés de manière irrégulière. Cela donne l'aspect caractéristique de ces cellules bleutées présentant des motifs générés par les cristaux. Leur rendement est de 16-18 % (On obtient ainsi une puissance de 160 à 180 Wc par m²). Ces cellules restent les plus utilisées du fait du rapport performance/prix plus intéressant que celui de leurs homologues monocristallins [22].

- Les cellules monocristallines :

CHAPITRE I : NOTIONS FONDAMENTALES SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

Ces cellules sont constituées de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du silicium. Leur rendement est de 17-20 % . Si aujourd'hui les cellules sont de type "Al-BSF" (*aluminium back surface field*) l'évolution vers des cellules "PERC" (*passivated emitter and rear cell*) permettra prochainement d'accéder à ± 23 % tandis que les cellules à hétérojonctions promettent déjà d'atteindre les 26 % en laboratoire [22].

9. 2. Cellules de deuxième génération :

Ce sont de cellules à base de couches minces (*Thin films*), dans cette génération le semi-conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre par exemple). Le silicium amorphe (a-Si), le tellure de cadmium (CdTe), le diséléniure de cuivre indium (CIS) font notamment partie de cette génération.

- Le Silicium amorphe :

Son rendement est de : 6 à 7 % soit 60-70 Wc/m².

Il est moins coûteux et moins polluant que la génération précédente et fonctionne avec un éclairage faible. De plus, le rendement global est faible et les performances de la cellule diminuent avec le temps [22].

- Le tellure de cadmium CdTe :

Le CdTe présente de bonnes performances, mais la toxicité du cadmium reste problématique pour sa production. Son rendement est de 11 à 15 % soit 110-150 Wc/m². En laboratoire, les cellules ont déjà atteint le rendement record en 2017 de 21,7 % pour des cellules CIGS. De quoi concurrencer les homologues cristallins [22]. Les avantages et les inconvénients sont les mêmes de ceux du Silicium amorphe.

9. 3. Cellules de troisième génération

Dans un but de réduire les coûts et de prévoir de nouvelles applications, une troisième génération de cellules tente d'atteindre de très hauts rendements dépassant les 30%.

- Cellules photovoltaïques organiques :

Le semi-conducteur utilisé est un polymère comme par exemple le poly acétylène. La première cellule photovoltaïque organique a fait son apparition en 1985 et avait un pourcentage d'efficacité d'environ 1 %.

Leur développement constitue une tentative de réduction du coût de l'électricité photovoltaïque. Ces cellules sont plus fines, flexibles, faciles et moins chères à produire, tout en étant résistantes, leur rendement est de : 8 % à 10%.

CHAPITRE I : NOTIONS FONDAMENTALES SUR LE PHOTOVOLTAÏQUE

Elles ont une forte absorption optique, des substrats variés, des techniques de dépôt assez simple, cependant leur durée de vie n'est toujours pas maîtrisée [23].

- **Cellules photovoltaïques Tandem (multi jonction) :**

Les cellules multi-jonctions sont composées d'un grand nombre de semiconducteur possédant chacun un rendement limité. Si l'on choisit des matériaux qui possèdent des longueurs d'ondes très proches les unes des autres, cela permettra aux cellules d'absorber un spectre plus grand et complet qui permettrait d'obtenir un rendement jusqu'à 50%.

Les cellules multi-jonctions vont permettre d'inventer de nouvelles techniques de production d'électricité à travers les panneaux solaires. Un semiconducteur comme le silicium ne peut produire de l'électricité qu'à partir d'une certaine longueur d'onde de rayon solaire. Grâce aux nouvelles méthodes scientifique on prévoit une exploitation possible des rayons solaires de près de 80% grâce à ces cellules multi-jonctions. Cela constituerait un grand progrès au niveau du rendement des panneaux photovoltaïques de nos jours. Le rendement record est d'environ 40%. Ces cellules sont développées beaucoup plus pour les applications spatiales, ce type de cellule n'est pas encore commercialisable et nécessite l'utilisation de métaux rares du coup leur coût de fabrication est élevé [23].

Conclusion :

Dans le présent chapitre nous avons passé en revue, dans une première étape, l'état de l'art du photovoltaïque. Par la suite nous avons vu la conversion photovoltaïque et les différents paramètres de la cellule. Par ailleurs on a montré ce que c'est le silicium nanocristallin, les méthodes de son élaboration ainsi que ses applications. Enfin nous avons passé en revue les différentes générations des cellules photovoltaïques. Il s'avère que le matériau de base de la cellule joue un rôle déterminant dans le rendement.

CHAPITRE II : MODÉLE ANALYTIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Introduction :

Dans ce chapitre nous exposons les différentes équations publiées dans la littérature, régissant le comportement d'une cellule photovoltaïque à base de silicium. En effet, nous optons à expliciter la relation courant - tension d'une cellule photovoltaïque. Le cas particulier d'une cellule photovoltaïque à base du silicium nanocristallin sera abordé à travers la prise en compte de plusieurs paramètres liés au confinement quantique dans ce matériau.

1. Cellules photovoltaïques en homojonction PN tout en silicium :

1. 1. Équations fondamentales dans les semiconducteurs :

Le calcul des courants dans une cellule photovoltaïque à jonction PN nécessite l'utilisation des équations fondamentales dans les semiconducteurs en l'occurrence :

1. 1.1 Équation de Poisson :

Cette équation relie la permittivité du matériau semiconducteur, la densité des charges d'espace et le potentiel électrostatique.

Son expression est donnée par :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\varepsilon} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (\text{II.1})$$

On a aussi :

$$\vec{\varepsilon} = -\vec{\nabla} \psi \quad (\text{II.2})$$

Et :

$$\rho = q(p - n + N_d - N_a) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

ψ : Potentiel électrostatique

ρ : Densité de charges d'espace

ε : Permittivité du semi-conducteur

p : Densité des trous

n : Densité des électrons

1. 1. 2. Équation de continuité :

- Pour les électrons :

On a :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_n + G_n - R_n \quad (\text{II.4})$$

En régime stationnaire : pas de variation dans le temps ($dn/dt = 0$) :

$$-\frac{1}{q} \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_n = G_n - R_n \quad (\text{II.5})$$

- Pour les trous :

On a :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_p + G_p - R_p \quad (\text{II.6})$$

En régime stationnaire : pas de variation dans le temps ($dp/dt = 0$) :

$$-\frac{1}{q} \cdot \vec{\nabla} \cdot \vec{J}_p = G_p - R_p \quad (\text{II.7})$$

Avec :

J_n : Densité du courant des électrons

J_p : Densité du courant des trous

G_n : Taux de génération des électrons

G_p : Taux de génération des trous

R_n : Taux de recombinaison des électrons

R_p : Taux de recombinaison des trous

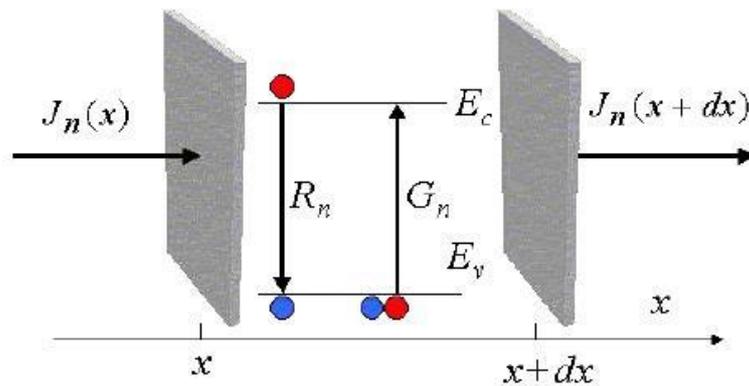


Figure II.1 Explication de l'équation de continuité dans la conversion photovoltaïque [8].

1.1.3. Équation de transport :

- Densité de courant de conduction pour les électrons :

$$J_{nc} = q \cdot n \cdot \mu_n \cdot E \quad (\text{II.8})$$

- Densité de courant de conduction pour les trous :

$$J_{pc} = q \cdot p \cdot \mu_p \cdot E \quad (\text{II.9})$$

Avec :

Un : Mobilité des électrons

Up : Mobilité des trous

E : Champs électrique

q : charge de l'électron

1.1. 4. Expressions des densités n et p

- Pour les électrons :

$$n = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_{fn} - E_{fi}}{K.T}\right) \quad (\text{II.10})$$

- Pour les trous :

$$p = n_i \cdot \exp\left(\frac{E_{fi} - E_{fp}}{K.T}\right) \quad (\text{II.11})$$

- n_i : Concentration intrinsèque

- E_f : Niveau de Fermi intrinsèque,

- E_{fn} : Niveau de Fermi extrinsèque pour un semiconducteur type n,

- E_f : Niveau de Fermi extrinsèque pour un semiconducteur type p

CHAPITRE II : MODÉLE ANALYTIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

- On remplace les expressions des densités n et p dans l'équation de transport pour les électrons et pour les trous. On aura alors les expressions de l'équation de transport :

- **Courant de diffusion Pour les électrons :**

$$\vec{J}_{nd} = q \cdot D_n \cdot \vec{\nabla}_n \quad (\text{II.12})$$

- **Courant de diffusion Pour les trous :**

$$\vec{J}_{pd} = -q \cdot D_p \cdot \vec{\nabla}_p \quad (\text{II.13})$$

Avec :

D_n : Coefficient de diffusion des électrons

D_p : Coefficient de diffusion des trous

- **Densité du courant total:**

Pour les électrons : $J_{nt} = J_{nc} + J_{nd} \quad (\text{II.13})$

Pour les trous : $J_{pt} = J_{pc} + J_{pd} \quad (\text{II.14})$

1.1. 5. Expressions des coefficients de diffusion :

En appliquant la relation d'Einstein :

- **Pour les électrons :**

$$D_n = \frac{K.T}{q} \mu_n \quad (\text{II.15})$$

- **Pour les trous :**

$$D_p = \frac{K.T}{q} \mu_p \quad (\text{II.16})$$

1.1. 6. Expressions de la permittivité :

La permittivité est le produit de la permittivité relative du matériau et la permittivité du vide.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \quad (\text{II.17})$$

ε_0 : Permittivité du vide

ε_r : Permittivité relative du matériau

1.1. 7. Expression de la concentration intrinsèque :

L'expression de la concentration intrinsèque est donnée par :

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{2.K.T}\right) \quad (\text{II.18})$$

Avec :

N_c : Densité d'état effectif des électrons dans la bande de conduction

N_v : Densité d'état effectif des trous dans la bande de valence

E_g : Énergie du gap de la bande interdite

K : Constante de Boltzmann

T : Température en degrés Kelvin

n_i : Concentration intrinsèque

1.1. 8. Expression de l'indice de réfraction

L'indice de réfraction est lié à la permittivité électrique et son expression est comme suit :

$$N_r^2 = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r \quad (\text{II.19})$$

$$N_r = \sqrt{\varepsilon_r} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

ε : Permittivité

ε_0 : Permittivité du vide

ε_r : Permittivité relative du matériau

N_r : Indice de réfraction

1.1. 9. Exemple d'une structure typique d'une jonction PN :

Nous considérons un cas de la littérature [8,24] d'une cellule photovoltaïque à une seule jonction PN comme le montre la figure (II.2). Cette structure est composée d'une région fenêtre, d'une couche monocristalline de silicium de type P et d'un substrat en silicium de type N.

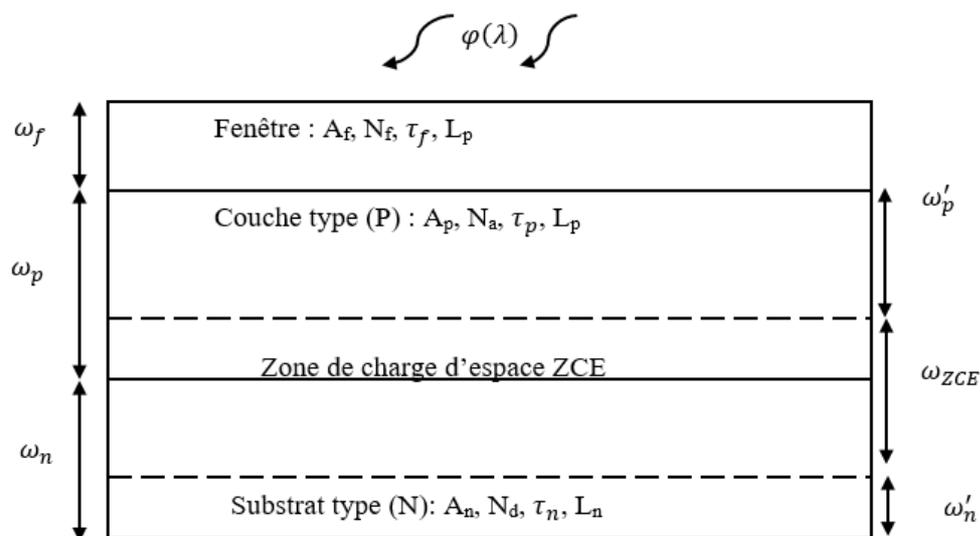


Figure II.2 : Structure d'une cellule photovoltaïque et ses paramètres

• **Paramètres du substrat N :**

- N_d : Taux de dopage N
- L_n : Longueur de diffusion des porteurs minoritaires
- τ_n : Durée de vie des porteurs minoritaires
- ω_n : Épaisseur du substrat N
- ω'_n : Épaisseur du substrat N en excluant la ZCE
- S_n : Vitesse de recombinaison
- A_n : Coefficient d'absorption du substrat N

• **Paramètres de la couche P :**

- N_a : Taux de dopage P
- L_p : Longueur de diffusion des porteurs minoritaires
- τ_p : Durée de vie des porteurs minoritaires
- ω_p : Épaisseur de la couche P
- ω'_p : Épaisseur de la couche P en excluant la ZCE
- S_p : Vitesse de recombinaison
- A_p : Coefficient d'absorption de la couche N

• **Paramètres de la région fenêtre :**

- N_f : Taux de dopage de la région fenêtre
- L_f : Longueur de diffusion des porteurs minoritaires
- τ_f : Durée de vie des porteurs minoritaires
- ω_f : Épaisseur de la région fenêtre
- S_f : Vitesse de recombinaison
- A_f : Coefficient d'absorption de la région fenêtre

• **Autres paramètres :**

- n_i : Concentration intrinsèque
- A : Coefficient d'absorption de la jonction PN
- ε : Constante diélectrique
- ω_{ZCE} : Epaisseur de la zone de charge d'espace ZCE
- V_d : Tension de diffusion

• **Largeur de la zone de charge d'espace :**

L'expression de la largeur de la zone de charge d'espace ZCE est donnée par :

$$\omega_{ZCE} = \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \cdot V_d} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

V_d : Tension de diffusion donnée par :

$$V_d = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left(\frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2} \right) \quad (\text{II.2})$$

• **Largeur effectives des zones N et P :**

Après l'apparition de la zone de charge d'espace nous notons que les épaisseurs du substrat N et de la couche P changent. L'expression des nouvelles épaisseurs est donnée comme suit :

Pour le substrat N :

$$\omega'_n = \omega_n - \sqrt{\frac{2 \cdot \varepsilon}{q} \frac{N_a}{N_d \cdot (N_a + N_d)} V_d} \quad (\text{II.23})$$

Et pour la couche P :

$$\omega'_p = \omega_p - \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon}{q} \frac{N_d}{N_a \cdot (N_a + N_d)} V_d} \quad (\text{II.24})$$

- **Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN :**

Le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN en tenant compte des résistances série et parallèle induites par les contacts ohmiques est donnée par la figure ci-dessous :

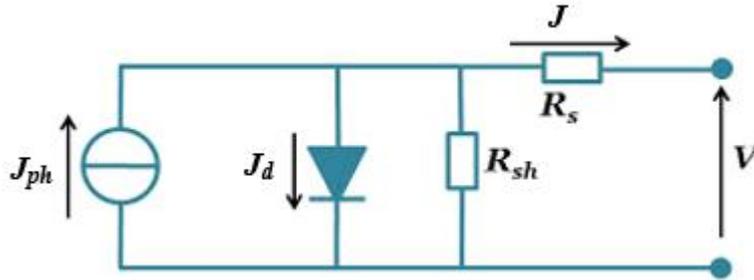


Figure II.3 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque à jonction pn

La densité du courant J est donnée par l'expression suivante :

$$J = J_{ph} - J_d(V + JR_s) - \frac{V + JR_s}{R_p} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

J_d : densité du courant direct de la jonction

J_{ph} : densité du photocourant

R_s : résistance série de la structure

R_p : résistance parallèle de la structure.

- **Expression analytique du photocourant I_{ph} :**

Quand la cellule photovoltaïque est exposée à un flux lumineux $\varphi(\lambda)$, la résolution des équations de continuité des porteurs de charges minoritaires dans la structure photovoltaïque de la figure II.2 donne [24] :

Le flux de photons interne $\varphi_1(\lambda)$ en surface de la couche fenêtre

$$\varphi_1(\lambda) = E(\lambda) \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} \cdot (1 - R(\lambda)) \cdot (1 - SF) \quad (\text{II.26})$$

CHAPITRE II : MODÉLE ANALYTIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Avec :

(λ) : L'irradiance spectrale AM1.5G sous référence ASTM G303 one-sun

SF : Fraction de la surface couverte par le métal (contact ohmique)

$R(\lambda)$: Coefficient de réflexion de la surface d'avant

Pour les autres couches, le flux de photons internes $\varphi_i(\lambda)$ est donnée par :

$$\varphi_i(\lambda) = \varphi_1(\lambda) \times T_i(\lambda) \quad (\text{II.27})$$

Avec :

$$T_i(\lambda) = \prod_1^j \exp(-A_j \times \omega_j) \quad (\text{II.28})$$

$T_i(\lambda)$: Coefficient de transmission

A_j : Coefficient d'absorption de la zone j

L'expression finale du photocourant est donnée par [22] :

$$I_{ph} = q \cdot \int_0^{\infty} \varphi(\lambda) \cdot EQE(\lambda) \cdot d\lambda \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$EQE(\lambda)$: Rendement quantique total de la cellule

Et l'expression du rendement quantique est donnée par :

$$EQE(\lambda) = EQE_f + EQE_p + EQE_n + EQE_{ZCE} \quad (\text{II.30})$$

Donc on aura :

$$I_{ph} = q \cdot \int_0^{\infty} \varphi(\lambda) \cdot [EQE_f(\lambda) + EQE_p(\lambda) + EQE_n(\lambda) + EQE_{ZCE}(\lambda)] \cdot d\lambda \quad (\text{II.31})$$

Avec :

$EQE_f(\lambda)$: Rendement quantique de la région fenêtre

$EQE_p(\lambda)$: Rendement quantique de la couche P

$EQE_n(\lambda)$: Rendement quantique du substrat N

$EQE_{ZCE}(\lambda)$: Rendement quantique de la zone de charge d'espace ZCE

- **Rendement quantique de la région fenêtre :**

$$EQE_f =$$

$$\frac{A_f \cdot L_f}{(A^2 \cdot L_f^2 - 1)} \times \left[\frac{\left(\frac{S_f \tau_f}{L_f} + A_f L_f \right) \exp(-A_f \omega_f) \left(\frac{S_f \tau_f}{L_f} \cosh \frac{\omega_f}{L_f} + \sinh \frac{\omega_f}{L_f} \right) - A_f L_f \exp(-A_f \omega_f)}{\frac{S_f \tau_f}{L_f} \sinh \frac{\omega_f}{L_f} + \cosh \frac{\omega_f}{L_f}} \frac{S_p \tau_p \sinh \frac{\omega_p}{L_p} + \cosh \frac{\omega_p}{L_p}}{L_p} \right]$$

(II.32)

- **Rendement quantique de la couche P :**

$$EQE_p = \exp(-A_f \omega_f) \frac{A L_p}{(A^2 L_p^2 - 1)} \times \left[\frac{\left(\frac{S_p \tau_p}{L_p} + A L_p \right) \exp(-A \omega'_p) \left(\frac{S_p \tau_p}{L_p} \cosh \frac{\omega'_p}{L_p} + \sinh \frac{\omega'_p}{L_p} \right) - A L_p \exp(-A \omega'_p)}{\frac{S_p \tau_p}{L_p} \sinh \frac{\omega'_p}{L_p} + \cosh \frac{\omega'_p}{L_p}} \right] \quad (II.33)$$

- **Rendement quantique de la zone de charge d'espace ZCE :**

$$EQE_{ZCE} = \exp(-A_f \omega_f - A \omega'_p) [1 - \exp(-A \omega_{ZCE})] \quad (II.34)$$

- **Rendement quantique du substrat P :**

$$EQE_n = \exp(-A_f \omega_f - A(\omega'_n + \omega_{ZCE})) \frac{A L_n}{(A^2 L_n^2 - 1)} \times \left[A L_n - \frac{\frac{S_n \tau_n}{L_n} \left(\cosh \frac{\omega'_n}{L_n} \exp(-A L_n) \right) + \sinh \frac{\omega'_n}{L_n} + A L_n \exp(-A \omega'_n)}{\frac{S_n \tau_n}{L_n} \sinh \frac{\omega'_n}{L_n} + \cosh \frac{\omega'_n}{L_n}} \right] \quad (II.35)$$

Expression analytique du courant direct J_d :

Ce courant est donné par :

$$J_d = J_s \left(\exp \left(\frac{V + J \cdot R_s}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (II.36)$$

L'expression de la densité de courant de saturation est déduite par la résolution de l'équation de continuité des porteurs minoritaire et est donnée par :

$$J_s = q \left(\frac{p_{n0} \cdot D_p}{L_p} + \frac{n_{p0} \cdot D_n}{L_n} \right) \quad (\text{II.37})$$

q : la charge élémentaire

D_p, D_n : les coefficients de diffusion des trous et des électrons, respectivement.

L_p, L_n : les longueurs de diffusion des trous et des électrons, respectivement.

n_{p0}, p_{n0} : sont les concentrations des porteurs (électrons et trous) minoritaires à l'équilibre dans les régions P et N respectivement.

2. Cellules photovoltaïques en hétérojonction avec une couche de silicium nanocristalline :

Pour le cas d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction à base d'une couche nanocristalline, les effets quantiques liés à la taille des nanocrystallites formant la couche impose des modifications sur certains paramètres physiques dépendant de la taille des nanocrystallites de silicium, en l'occurrence, l'énergie de gap et la permittivité diélectrique. Notons que ces deux paramètres rentrent dans plusieurs expressions caractérisant les équations que supporte le modèle mathématique de la cellule en question.

2. 1. Rayon de Bohr :

Le rayon de Bohr est la longueur qui sépare l'électron du proton. Les expressions des rayons de Bohr sont données comme suit [25,26] :

$$a_b = \alpha_0 \varepsilon_r \frac{m_0}{m} \quad (\text{II.38})$$

$$a_{bt} = \alpha_0 \varepsilon_r \frac{m_0}{m_t} \quad (\text{II.39})$$

$$a_{be} = \alpha_0 \varepsilon_r \frac{m_0}{m_e} \quad (\text{II.40})$$

On a aussi :

$$a_b = a_{bt} + a_{be} \quad (\text{II.41})$$

Avec :

α_0 : Rayon de l'atome d'Hydrogène

ε_r : Permittivité diélectrique relative

m_0 : Masse de l'électron libre (appartenant à un atome isolé).

m : Masse de l'exciton

m_e : Masse effective des électrons

m_t : Masse effective des trous

Et l'expression du rayon d'atome d'Hydrogène est donnée par :

$$\alpha_0 = \frac{\varepsilon_0 \cdot h^2}{\pi \cdot m_0 \cdot q^2} \quad (\text{II.42})$$

2. 2. Confinement quantique :

Par comparaison de la taille de la nanocristallites au rayon de Bohr, on distingue trois régimes de confinement quantique. A partir de ces trois régimes, l'expression de l'énergie de gap est donnée en fonction de la taille des nanocristaux [25,26].

A- Régime fort confinement :

Si : $r_{nano} \ll a_{bt}$

L'expression de l'énergie gap E_g du nano semi-conducteur est comme suit :

$$E_g(r) = E_{g0} + \frac{h^2}{8 \cdot m_0 \cdot r^2} - \frac{1,786 \cdot q^2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r} - 0,248 \frac{m}{m_e \varepsilon_r^2} E_{x0} \quad (\text{II.43})$$

B- Régime faible confinement :

Si : $r_{nano} > a_b$

L'expression de l'énergie gap E_g du nano semi-conducteur est comme suit :

$$E_g(r) = E_{g0} + \frac{h^2}{8 \cdot m_0 \cdot r^2} - \frac{m}{m_e \varepsilon_r^2} E_{x0} \quad (\text{II.44})$$

C- Régime moyen confinement :

Si : $a_b > r_{nano} > a_{bt}$

L'expression de l'énergie gap E_g du nano semi-conducteur est comme suit :

$$E_g(r) = E_{g0} + \frac{h^2}{8 \cdot m_0 \cdot r^2} - \frac{1,786 \cdot q^2}{4 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r} - 0,248 \frac{m}{m_e \varepsilon_r^2} E_{x0} \quad (\text{II.45})$$

Avec :

E_{x0} : L'énergie de liaison de l'atome d'hydrogène, tel que :

$$E_{x0} = \frac{m_e q^4}{8 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot h^2} \quad (\text{II.46})$$

Et :

CHAPITRE II : MODÈLE ANALYTIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

E_{g0} : Énergie gap du matériau à l'échelle massif

ϵ_0 : Permittivité diélectrique du vide

ϵ_r : Permittivité diélectrique relative

m_0 : Masse de l'électron de l'atome iso

m : Masse de l'exciton

m_t : Masse effective des trous

m_e : Masse effective des électrons

h : Constante de Planck

q : Charge de l'électron

Le changement de l'énergie de la bande interdite E_g dans les semiconducteurs nanocristallins qui est en fonction du rayon de la nanocristallite provoque un changement dans la concentration intrinsèque n_i tel que :

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \times \exp\left(\frac{-E_g}{2.K.T}\right) \quad (\text{II.47})$$

Le changement dans la concentration intrinsèque dans les semiconducteurs nanocristallins provoque à son tour un changement dans la tension de diffusion V_d car cette tension est en fonction de n_i , tel que :

$$V_d = \frac{K.T}{q} \cdot \ln \frac{N_a \cdot N_d}{n_i^2} \quad (\text{II.48})$$

2. 3. Permittivité diélectrique :

L'expression de la permittivité diélectrique en fonction du rayon 'r' du nanocristalle est donnée par [27,28].

$$\epsilon_r = 1 + \frac{10,04}{1 + \left(\frac{1,38}{10^9 \cdot r}\right)^{1,37}} \quad (\text{II.49})$$

Il est à noter que dans les semi-conducteurs nanocristallins, la largeur de zone de charge d'espace ZCE ou la zone de déplétion varie en fonction de la nouvelle tension de diffusion et de la permittivité électrique, tel que :

$$\omega_{ZCE} = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \cdot V_d} \quad (\text{II.50})$$

2. 4. Coefficient d'absorption :

Le coefficient d'absorption du silicium nanocristallin est donné par la formule semi empirique de Rajkanan et al [29].

CHAPITRE II : MODÈLE ANALYTIQUE DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

$$A(T) = \sum_{j=1,2} C_i \cdot A_j \left(\frac{[h\nu - E_{gj}(T) + E_{pi}]^2}{\exp(E_{pi}.K.T) - 1} + \frac{[h\nu - E_{gj}(T) - E_{pi}]^2}{1 - \exp(-E_{pi}.K.T)} \right) + A_d (h\nu \cdot E_{gd}[T])^{\frac{1}{2}}$$

(II.51)

Avec :

$$E_{g1}(0) : 1,1557\text{eV.}$$

$$E_{g2}(0) : 2,5\text{eV}$$

$$E_{gd}(0) : 3,2\text{eV}$$

$$E_{p1} : 1,827 \cdot 10^{-2}\text{eV}$$

$$E_{p2} : 5,773 \cdot 10^{-2}\text{eV}$$

$$C_1 : 5,5.$$

$$C_2 : 4,0$$

$$A_1 : 3,231 \cdot 10^2 \text{cm}^{-1}\text{eV}^{-2}$$

$$A_2 : 7,237 \cdot 10^3 \text{cm}^{-1}\text{eV}^{-2}$$

$$A_d : 1,052 \cdot 10^6 \text{cm}^{-1}\text{eV}^{-2}$$

$$h : 4,136 \cdot 10^{-15} \text{eV.s}$$

$$K : 8,617 \cdot 10^{-5} \text{eV.K}^{-1}$$

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons explicité les différentes équations que supporte le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque en silicium. En effet, nous avons abordé le cas d'une homojonction et le cas d'une hétérojonction. Dans les cellules photovoltaïques en hétérojonctions avec une couche de silicium nanocristallin, on note plusieurs paramètres qui changent. Suivant le confinement quantique, l'énergie de la bande interdite et la permittivité diélectrique changent, ce qui provoque un changement de la concentration intrinsèque et ainsi de la tension de diffusion et de la largeur de la zone de charge d'espace. D'autre part, le changement du coefficient d'absorption qui est en fonction de l'énergie gap provoque lui aussi un changement dans le flux des photons internes conduisant ainsi à une nouvelle expression du courant circulant dans la cellule photovoltaïque.

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE
NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES
PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE NANOCRISTALLINE
PAR LE LOGICIEL PC1D

Introduction

Ce chapitre est dédié à la simulation d'une cellule photovoltaïque à hétérojonction en silicium nanocristallin par utilisation du logiciel PC1D. L'étude sera menée en fonction de la densité de dopage de la couche nanocristalline et de la taille moyenne des nanocristaux de silicium formant la couche. Notons que durant la simulation, nous avons remarqué que ce sont ces deux paramètres qui influencent les rendements obtenus.

1. Simulation d'une cellule photovoltaïque par le logiciel PC1D

1.1 Présentation du logiciel PC1D

PC1D est un logiciel très utilisé en photovoltaïque grâce à son efficacité et sa simplicité dans la simulation des structures à une dimension généralement de type monocristalline. Si la structure morphologique change, il est impératif que certains paramètres physiques relatifs aux matériaux constituant la structure doivent subir un calcul préalable. Notons que notre cas nous nous intéressons à la simulation d'une cellule photovoltaïque à base de silicium nanocristallin dont Plusieurs paramètres physiques de ce matériaux dépendent essentiellement de la taille des nanocristaux comme nous l'avons mentionné précédemment. De ce fait, un calcul préalable a été effectué avant de passer à la simulation de la structure en question.

Les principales données à fournir au logiciel sont les suivants :

- Epaisseurs des régions,
- Bandes interdites,
- Concentrations intrinsèques,
- Constantes diélectriques,
- Concentrations des dopages,
- Durées de vie des porteurs,
- Taux de recombinaison des porteurs,
- Mobilités des porteurs,
- Indices de réfraction,
- Coefficients d'absorption.

1.2 Cas d'une cellule photovoltaïque avec une taille moyenne des nanocristaux de 6 nm.

Vu la particularité des paramètres physiques concernant le silicium nanocristallin (exposés dans le chapitre précédent), une étape de calcul de ces paramètres doit précéder chaque simulation. Pour cela nous devons commencer par calculer l'énergie du gap de ce

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE
NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

nano matériau, sa concentration intrinsèque, sa permittivité électrique et son indice de réfraction relatifs à une taille moyenne des nanocristaux de 6 nm.

1.2. 1. Énergie de gap

Pour pouvoir calculer l'énergie de la bande interdite, il faut d'abord vérifier dans quel régime de confinement quantique est soumis notre échantillon.

On va commencer par comparer la taille des nanocristaux avec les rayons de Bohr.

On a:

$$r_{nano} = 6nm$$

Et :

$$r_{nano} > a_b \quad (III.1)$$

$$a_b = 0,174 \text{ nm}$$

Donc on est dans le régime de faible confinement quantique. L'expression de l'énergie gap est donnée par :

$$E_g(r) = E_{g0} + \frac{h^2}{8.m_0.r^2} - \frac{m}{m_e \epsilon_r^2} E_{x0} \quad (III.2)$$

Application numérique : $E_g(6nm) = 1,092 \text{ eV}$

1.2. 2. Concentration intrinsèque

L'expression de la concentration intrinsèque est proportionnelle à l'énergie de la bande interdite gap. Elle est donnée par :

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \times \exp\left(\frac{-E_g}{2.K.T}\right) \quad (III.3)$$

Application numérique : $n_i = 8 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$

1.2. 3. Permittivité relative

L'expression de la permittivité relative est donnée par :

$$\epsilon_r = 1 + \frac{10,04}{1 + \left(\frac{1,38}{10^9.r}\right)^{1,37}} \quad (III.4)$$

Application numérique : $\epsilon_r = 9,8573$

1.2. 4. Indice de réfraction

L'expression de l'indice de réfraction est donnée par :

$$N_r = \sqrt{\epsilon_r} \quad (III.5)$$

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE
NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

Application numérique : $N_r = 3,140$

1.2. 5. Simulation et interprétation des résultats

A l'aide des paramètres calculés ci-dessus, nous allons simuler ce type de cellules photovoltaïques à l'aide du logiciel de simulation PC1D en considérant plusieurs concentrations du dopage de la couche nanométrique.

A. Premier cas de dopage

Nous considérons une couche nanométrique d'épaisseur 150 nm avec un dopage de concentration 10^{17} cm^{-3} . Ci-dessous sont les détails de la simulation :

	Épaisseur	Constante diélectrique	Énergie du gap	Concentration intrinsèque	Indice de réfraction	Taux de dopage
Couche nanocristalline type (P)	0,15 (μm)	9,8573	1,092 eV	8.10^9 cm^{-3}	3,14	10^{17} cm^{-3}
Substrat type (N)	10 (μm)	11,9	1,124 eV	$1.10^{10} \text{ cm}^{-3}$	3,58	10^{16} cm^{-3}

Tableau III.1 : Paramètres de simulation.

La figure (III-1) représente la variation du courant en fonction de la tension (courbe en rouge) et la courbe de puissance (en vert).



Figure III.1 : Caractéristique courant-tension et courbe de puissance

On déduit les paramètres suivants :

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

- $I_{cc} = 29,8 \text{ mA}$
- $V_{oc} = 0,7956 \text{ V}$
- $P_m = 20,4 \text{ mW}$

Ainsi le facteur de forme et le rendement sont :

- $FF = 86\%$
- $\eta = 20,4\%$

B. Deuxième cas de dopage

Dans ce premier dopage, nous allons doper notre couche nanométrique d'épaisseur de 150 (nm) avec un dopage de concentration de 10^{18} cm^{-3} . Ci-dessous sont les résultats de la simulation :

	Épaisseur	Constante diélectrique	Énergie du gap	Concentration intrinsèque	Indice de réfraction	Taux de dopage
Couche nanocristalline type (P)	0,15 (μm)	9,8573	1,092 eV	$8 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$	3,14	10^{18} cm^{-3}
Substrat type (N)	10 (μm)	11,9	1,124 eV	$1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$	3,58	10^{16} cm^{-3}

Tableau III.2 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 6nm et d'un dopage de 10^{18} cm^{-3})

La figure (III-2) représente la variation du courant en fonction de la tension (courbe en rouge) et la courbe de puissance (en vert).



Figure III.2 : Caractéristique courant-tension et courbe de puissance

On déduit les paramètres suivants :

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

- $I_{cc} = 29,8 \text{ mA}$
- $V_{oc} = 0,7950 \text{ V}$
- $P_m = 20,4 \text{ mW}$

Ainsi le facteur de forme et le rendement sont :

- $FF = 86,1\%$
- $\eta = 20,4\%$

C. Troisième cas de dopage

Dans ce premier dopage, nous allons doper notre couche nanométrique d'épaisseur de 150 (nm) avec un dopage de concentration de 10^{19} cm^{-3} . Ci-dessous sont les résultats de la simulation :

	Épaisseur	Constante diélectrique	Énergie du gap	Concentration intrinsèque	Indice de réfraction	Taux de dopage
Couche nanocristalline type (P)	0,15 (μm)	9,8573	1,092 eV	8.10^9 cm^{-3}	3,14	10^{19} cm^{-3}
Substrat type (N)	10 (μm)	11,9	1,124 eV	$1.10^{10} \text{ cm}^{-3}$	3,58	10^{16} cm^{-3}

Tableau III.3 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 6nm et d'un dopage de 10^{19} cm^{-3})

La figure (III-3) représente la variation du courant en fonction de la tension (courbe en rouge) et la courbe de puissance (en vert).



Figure III.3 : Caractéristique courant-tension et courbe de puissance

On déduit les paramètres suivants :

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

- $I_{cc} = 29,8 \text{ mA}$
- $V_{oc} = 0,7791 \text{ V}$
- $P_m = 19,9 \text{ mW}$

Ainsi le facteur de forme et le rendement sont :

- $FF = 85,7\%$
- $\eta = 19,9\%$

D. Quatrième cas de dopage

Dans ce premier dopage, nous allons doper notre couche nanométrique d'épaisseur de 150 (nm) avec un dopage de concentration de 10^{20} cm^{-3} . Ci-dessous sont les résultats de la simulation :

	Épaisseur	Constante diélectrique	Énergie du gap	Concentration intrinsèque	Indice de réfraction	Taux de dopage
Couche nanocristalline type (P)	0,15 (μm)	9,8573	1,092 eV	8.10^9 cm^{-3}	3,14	10^{20} cm^{-3}
Substrat type (N)	10 (μm)	11,9	1,124 eV	$1.10^{10} \text{ cm}^{-3}$	3,58	10^{16} cm^{-3}

Tableau III.4 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 6nm et d'un dopage de 10^{20} cm^{-3})

La figure (III-4) représente la variation du courant en fonction de la tension (courbe en rouge) et la courbe de puissance (en vert).



Figure III.4 : Caractéristique courant-tension et courbe de puissance

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

On déduit les paramètres suivants :

- $I_{cc} = 29,7 \text{ mA}$
- $V_{oc} = 0,7021 \text{ V}$
- $P_m = 17,5 \text{ mW}$

Ainsi le facteur de forme et le rendement sont :

- $FF = 83,9\%$
- $\eta = 17,5\%$

Après l'analyse des résultats de toutes les simulations en fonction du dopage on remarque les points suivants :

- Il s'avère que le courant de court-circuit est indépendant de la concentration du dopage.
- Avec un dopage de 10^{17} cm^{-3} et de 10^{18} cm^{-3} la tension de circuit ouvert est pratiquement la même ; Par contre pour des valeurs de dopage supérieures, cette tension diminue en fonction des concentrations de dopage.
- Avec un dopage de 10^{17} cm^{-3} et de 10^{18} cm^{-3} la puissance maximale de la cellule est la même ; Par contre pour des concentrations plus élevées, cette puissance a tendance à diminuer en fonction des concentrations de dopage.
- Enfin le rendement de la cellule et le facteur de forme suivent le comportement de la puissance maximale de la cellule.

1.3 Cas d'une cellule photovoltaïque avec une taille moyenne des nanocristaux de 4 nm :

1.3. 1. Énergie de gap :

Pour pouvoir calculer l'énergie de la bande interdite, il faut d'abord vérifier dans quel régime de confinement quantique est notre échantillon.

On va commencer par comparer le rayon de notre nano cristal avec les rayons de Bohr.

On a:

$$r_{nano} = 4nm$$

Et:

$$r_{nano} > a_b \quad (\text{III.6})$$

$$a_b = 0,162 \text{ nm}$$

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

Donc on est dans le régime de faible confinement quantique

L'expression de l'énergie gap est donnée par :

$$E_g(r) = E_{g0} + \frac{h^2}{8.m_0.r^2} - \frac{m}{m_e \epsilon_r^2} E_{x0} \quad (\text{III.7})$$

Application numérique : $E_g(4nm) = 1,126 \text{ eV}$

1.3. 2. Concentration intrinsèque

L'expression de la concentration intrinsèque est proportionnelle à l'énergie de la bande interdite gap. Elle est donnée par :

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \times \exp\left(\frac{-E_g}{2.K.T}\right) \quad (\text{III.8})$$

Application numérique : $n_i = 4 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$

1.3. 3. Permittivité relative

L'expression de la permittivité relative est donnée par :

$$\epsilon_r = 1 + \frac{10,04}{1 + \left(\frac{1,38}{10^9.r_{nano}}\right)^{1,37}} \quad (\text{III.9})$$

Application numérique : $\epsilon_r = 9,1447$

1.3. 4. Indice de réfraction

L'expression de l'indice de réfraction est donnée par :

$$N_r = \sqrt{\epsilon_r} \quad (\text{III.10})$$

Application numérique : $N_r = 3,024$

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE
NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

1.3. 5. Simulation et interprétation des résultats :

A. Premier cas de dopage :

Dans ce premier dopage, nous allons doper notre couche nanométrique d'épaisseur de 150 (nm) avec un dopage de concentration de 10^{17} cm^{-3} . Ci-dessous sont les résultats de la simulation :

	Épaisseur	Constante diélectrique	Énergie du gap	Concentration intrinsèque	Indice de réfraction	Taux de dopage
Couche nanocristalline type (P)	0,15 (μm)	9,1447	1,126 eV	4.10^9 cm^{-3}	3,024	10^{17} cm^{-3}
Substrat type (N)	10 (μm)	11,9	1,124 eV	$1.10^{10} \text{ cm}^{-3}$	3,58	10^{16} cm^{-3}

Tableau III.5 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 4nm et d'un dopage de 10^{17} cm^{-3})

La figure (III-5) représente la variation du courant en fonction de la tension (courbe en rouge) et la courbe de puissance (en vert).



Figure III.5 : Caractéristique courant-tension et courbe de puissance

On déduit les paramètres suivants :

- $I_{cc} = 29,8 \text{ mA}$
- $V_{oc} = 0,7956 \text{ V}$
- $P_m = 20,5 \text{ mW}$

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

Ainsi le facteur de forme et le rendement sont :

- FF = 86.5%
- $\eta = 20,5\%$

B. Deuxième cas de dopage :

Dans ce premier dopage, nous allons doper notre couche nanométrique d'épaisseur de 150 (nm) avec un dopage de concentration de 10^{18} cm^{-3} .

Ci-dessous sont les résultats de la simulation :

	Épaisseur	Constante diélectrique	Énergie du gap	Concentration intrinsèque	Indice de réfraction	Taux de dopage
Couche nanocristalline type (P)	0,15 (μm)	9,1447	1,126 eV	4.10^9 cm^{-3}	3,024	10^{18} cm^{-3}
Substrat type (N)	10 (μm)	11,9	1,124 eV	$1.10^{10} \text{ cm}^{-3}$	3,58	10^{16} cm^{-3}

Tableau III.6. Paramètres de simulation (couche de rayon de 4nm et d'un dopage de 10^{18} cm^{-3})

La figure (III-6) représente la variation du courant en fonction de la tension (courbe en rouge) et la courbe de puissance (en vert).



Figure III.6 : Caractéristique courant-tension et courbe de puissance

On déduit les paramètres suivants :

- $I_{cc} = 29,8 \text{ mA}$
- $V_{oc} = 0,7955 \text{ V}$

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

- $P_m = 20,5 \text{ mW}$

On calcule alors le facteur de forme et le rendement tel que :

- $FF = 86,5\%$

- $\eta = 20,5\%$

C. Troisième cas de dopage

Dans ce premier dopage, nous allons doper notre couche nanométrique d'épaisseur de 150 (nm) avec un dopage de concentration de 10^{19} cm^{-3} .

Ci-dessous sont les résultats de la simulation :

	Épaisseur	Constante diélectrique	Énergie du gap	Concentration intrinsèque	Indice de réfraction	Taux de dopage
Couche nanocristalline type (P)	0,15 (μm)	9,1447	1,126 eV	$4 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$	3,024	10^{19} cm^{-3}
Substrat type (N)	10 (μm)	11,9	1,124 eV	$1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$	3,58	10^{16} cm^{-3}

Tableau III.7 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 4nm et d'un dopage de 10^{19} cm^{-3})

La figure (III-7) représente la variation du courant en fonction de la tension (courbe en rouge) et la courbe de puissance (en vert).



Figure III.7 : Caractéristique courant-tension et courbe de puissance

On déduit les paramètres suivants :

- $I_{cc} = 29,8 \text{ mA}$

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

- $V_{oc} = 0,7908 \text{ V}$
- $P_m = 20,3 \text{ mW}$

Ainsi le facteur de forme et le rendement sont :

- $FF = 86,1\%$
- $\eta = 20,3\%$

D. Quatrième cas de dopage

Dans ce premier dopage, nous allons doper notre couche nanométrique d'épaisseur de 150 (nm) avec un dopage de concentration de 10^{20} cm^{-3} . Ci-dessous sont les résultats de la simulation :

	Épaisseur	Constante diélectrique	Énergie du gap	Concentration intrinsèque	Indice de réfraction	Taux de dopage
Couche nanocristalline type (P)	0,15 (μm)	9,1447	1,126 eV	$4 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$	3,024	10^{20} cm^{-3}
Substrat type (N)	10 (μm)	11,9	1,124 eV	$1 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$	3,58	10^{16} cm^{-3}

Tableau III.8 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 4nm et d'un dopage de 10^{20} cm^{-3})

La figure (III-8) représente la variation du courant en fonction de la tension (courbe en rouge) et la courbe de puissance (en vert).



Figure III.8 : Caractéristique courant-tension et courbe de puissance

On déduit les paramètres suivants :

- $I_{cc} = 29,7 \text{ mA}$

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

- $V_{oc} = 0,7368 \text{ V}$
- $P_m = 18,6 \text{ mW}$

Ainsi le facteur de forme et le rendement sont :

- $FF = 84,9\%$
- $\eta = 18,6\%$

Notons que les lois de variation en fonction du dopage des paramètres déduits de la simulation restent les mêmes que celles relatives à la couche prétendante.

1.4. Cas d'une cellule photovoltaïque avec une taille moyenne des nanocristaux de 2 nm

1.4. 1. Énergie de gap

Pour pouvoir calculer l'énergie de la bande interdite, il faut d'abord vérifier dans quel régime de confinement quantique est notre échantillon.

On va commencer par comparer le rayon de notre nano cristal avec les rayons de Bohr.

On a:

$$r_{nano} = 2nm$$

Et:

$$r_{nano} > a_b \quad (\text{III.11})$$

$$a_b = 0,141 \text{ nm}$$

Donc on est dans le régime de faible confinement quantique.

L'expression de l'énergie gap est donnée par :

$$E_g(r) = E_{g0} + \frac{h^2}{8.m_0.r^2} - \frac{m}{m_e \epsilon_r^2} E_{x0} \quad (\text{III.12})$$

Application numérique : $E_g(2nm) = 1,314 \text{ eV}$

1.4. 2. Concentration intrinsèque :

L'expression de la concentration intrinsèque est proportionnelle à l'énergie de la bande interdite gap.

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE
NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

Elle est donnée par :

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \times \exp\left(\frac{-E_g}{2.K.T}\right) \quad (\text{III.13})$$

Application numérique : $n_i = 1 \times 10^8$

1.4. 3. Permittivité relative :

L'expression de la permittivité relative est donnée par :

$$\epsilon_r = 1 + \frac{10,04}{1 + \left(\frac{1,38}{10^9 \cdot r_{nano}}\right)^{1,37}} \quad (\text{III.14})$$

Application numérique : $\epsilon_r = 7,9722$

1.4. 4. Indice de réfraction

L'expression de l'indice de réfraction est donnée par :

$$N_r = \sqrt{\epsilon_r} \quad (\text{III.15})$$

Application numérique : $N_r = 2,824$

1.4. 5. Simulation et interprétation des résultats

A. Premier cas de dopage

Dans ce premier dopage, nous allons doper notre couche nanométrique d'épaisseur de 150 (nm) avec un dopage de concentration de 10^{17} cm^{-3} .

Ci-dessous sont les résultats de la simulation :

	Épaisseur	Constante diélectrique	Énergie du gap	Concentration intrinsèque	Indice de réfraction	Taux de dopage
Couche nanocristalline type (P)	0,15 (μm)	7,9722	1,314 eV	1.10^8 cm^{-3}	2,824	10^{17} cm^{-3}
Substrat type (N)	10 (μm)	11,9	1,124 eV	$1.10^{10} \text{ cm}^{-3}$	3,58	10^{16} cm^{-3}

Tableau III.9. Paramètres de simulation (couche de rayon de 2nm et d'un dopage de 10^{17} cm^{-3})

La figure (III-9) représente la variation du courant en fonction de la tension (courbe en rouge) et la courbe de puissance (en vert).

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE
NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

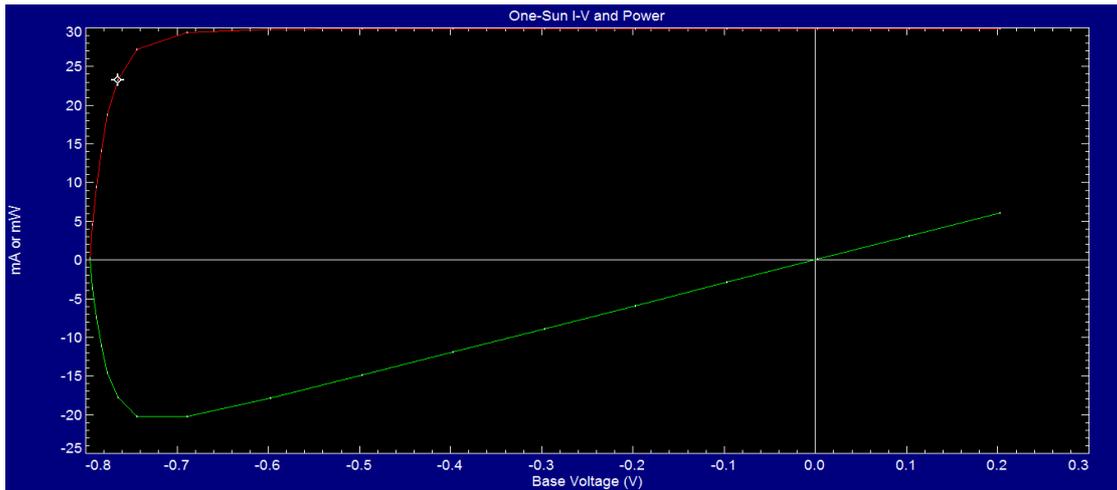


Figure III.9 : Caractéristique courant-tension et courbe de puissance

On déduit les paramètres suivants :

- $I_{cc} = 29,9 \text{ mA}$
- $V_{oc} = 0,7956 \text{ V}$
- $P_m = 20,6 \text{ mW}$

Ainsi le facteur de forme et le rendement sont :

- $FF = 86,6\%$
- $\eta = 20,6\%$

B. Deuxième cas de dopage

Dans ce premier dopage, nous allons doper notre couche nanométrique d'épaisseur de 150 (nm) avec un dopage de concentration de 10^{18} cm^{-3} . Ci-dessous sont les résultats de la simulation :

	Épaisseur	Constante diélectrique	Énergie du gap	Concentration intrinsèque	Indice de réfraction	Taux de dopage
Couche nanocristalline type (P)	0,15 (μm)	7,9722	1,314 eV	1.10^8 cm^{-3}	2,824	10^{18} cm^{-3}
Substrat type (N)	10 (μm)	11,9	1,124 eV	$1.10^{10} \text{ cm}^{-3}$	3,58	10^{16} cm^{-3}

Tableau III.10 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 2nm et d'un dopage de 10^{18} cm^{-3})

La figure (III-10) représente la variation du courant en fonction de la tension (courbe en rouge) et la courbe de puissance (en vert).

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D



Figure III.10 : Caractéristique courant-tension et courbe de puissance

On déduit les paramètres suivants :

- $I_{cc} = 29,9 \text{ mA}$
- $V_{oc} = 0,7955 \text{ V}$
- $P_m = 20,6 \text{ mW}$

Ainsi le facteur de forme et le rendement sont :

- $FF = 86,6\%$
- $\eta = 20,6\%$

C. Troisième cas de dopage

Dans ce premier dopage, nous allons doper notre couche nanométrique d'épaisseur de 150 (nm) avec un dopage de concentration de 10^{19} cm^{-3} . Ci-dessous sont les résultats de la simulation :

	Épaisseur	Constante diélectrique	Énergie du gap	Concentration intrinsèque	Indice de réfraction	Taux de dopage
Couche nanocristalline type (P)	0,15 (μm)	7,9722	1,314 eV	1.10^8 cm^{-3}	2,824	10^{19} cm^{-3}
Substrat type (N)	10 (μm)	11,9	1,124 eV	$1.10^{10} \text{ cm}^{-3}$	3,58	10^{16} cm^{-3}

Tableau III.11 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 2nm et d'un dopage de 10^{19} cm^{-3})

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

La figure (III-11) représente la variation du courant en fonction de la tension (courbe en rouge) et la courbe de puissance (en vert).

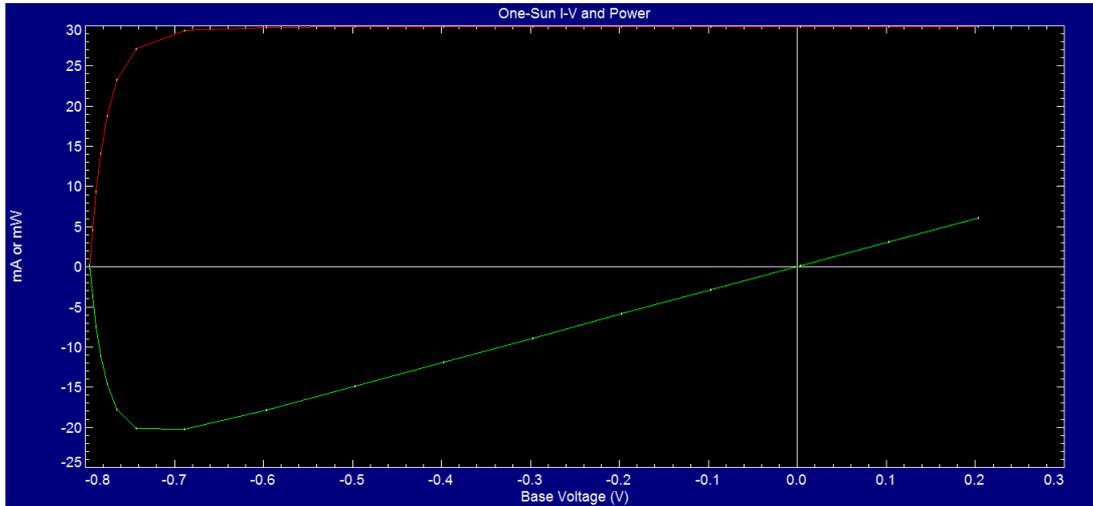


Figure III.11 : Caractéristique courant-tension et courbe de puissance

On déduit les paramètres suivants :

- $I_{cc} = 29,9 \text{ mA}$
- $V_{oc} = 0,7952 \text{ V}$
- $P_m = 20,5 \text{ mW}$

Ainsi le facteur de forme et le rendement sont :

- $FF = 86,4\%$
- $\eta = 20,5\%$

D. Quatrième cas de dopage

Dans ce premier dopage, nous allons doper notre couche nanométrique d'épaisseur de 150 (nm) avec un dopage de concentration de 10^{20} cm^{-3} .

Ci-dessous sont les résultats de la simulation :

	Épaisseur	Constante diélectrique	Énergie du gap	Concentration intrinsèque	Indice de réfraction	Taux de dopage
Couche nanocristalline type (P)	0,15 (μm)	7,9722	1,314 eV	1.10^8 cm^{-3}	2,824	10^{20} cm^{-3}
Substrat type (N)	10 (μm)	11,9	1,124 eV	$1.10^{10} \text{ cm}^{-3}$	3,58	10^{16} cm^{-3}

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

Tableau III.12 : Paramètres de simulation (couche de rayon de 2nm et d'un dopage de 10^{20} cm^3)

La figure (III-12) représente la variation du courant en fonction de la tension (courbe en rouge) et la courbe de puissance (en vert).

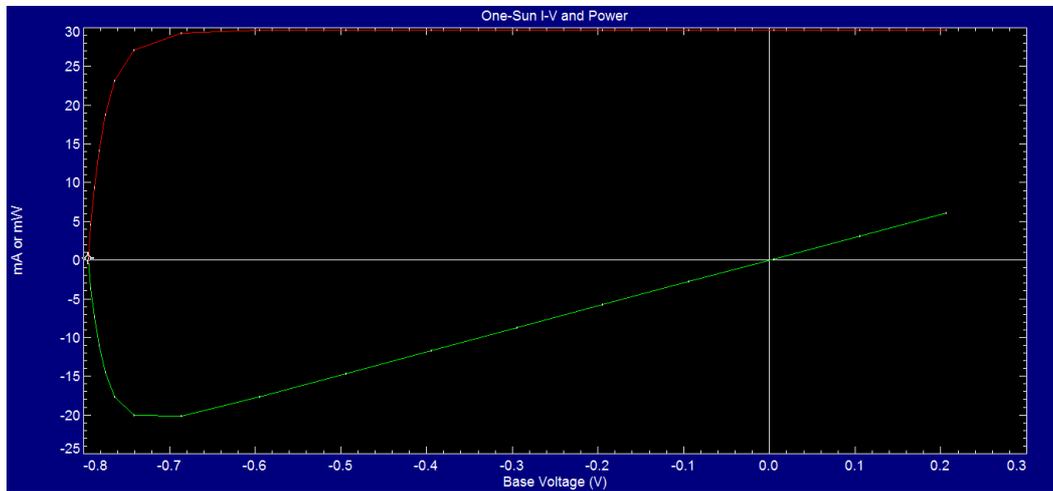


Figure III.12 : Caractéristique courant-tension et courbe de puissance

On déduit les paramètres suivants :

- $I_{cc} = 29,7 \text{ mA}$
- $V_{oc} = 0,7947 \text{ V}$
- $P_m = 20,4 \text{ mW}$

Ainsi le facteur de forme et le rendement sont :

- $FF = 86,2\%$

Notons que les lois de variation en fonction du dopage des paramètres déduits de la simulation restent les mêmes que celles relatives à la couche prépondérante.

1.5 Étude comparative des résultats de simulation

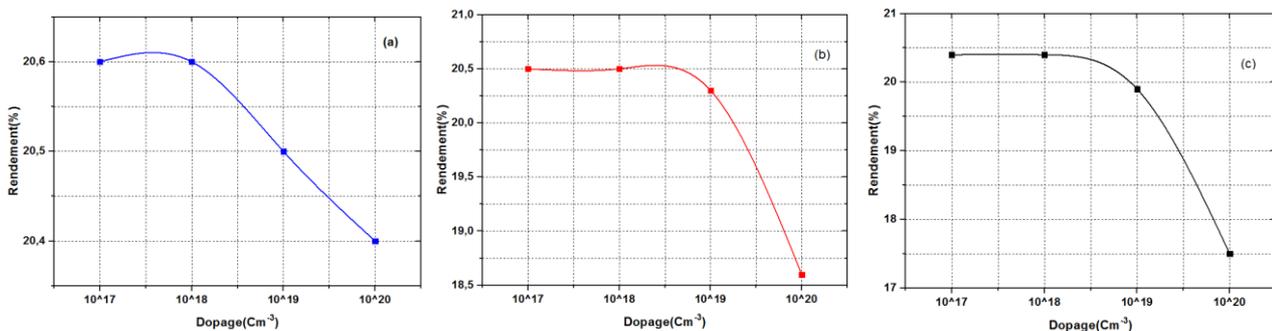


Figure III.13 : La variation du rendement en fonction de concentrations de dopage

CHAPITRE III : SIMULATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES À COUCHE NANOCRISTALLINE PAR LE LOGICIEL PC1D

- a) la couche de taille moyenne de 2 nm
- b) la couche de taille moyenne de 4 nm
- c) la couche de taille moyenne de 6 nm

La figure III.14 représente la variation du rendement en fonction du dopage pour trois tailles de nanocristaux formant la couche. Nous observons clairement une diminution du rendement avec l'accroissement du taux de dopage. Notons que cette diminution s'accroît pour les dopages les plus forts.

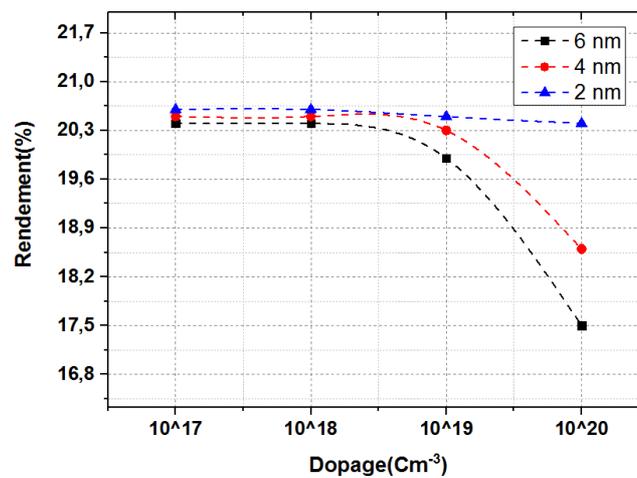


Figure III.14 : La variation du rendement en fonction des concentrations de dopage pour trois couches de tailles différentes

La figure III.14 représente la superposition de la variation du rendement en fonction du dopage pour les trois tailles considérées. Nous remarquons clairement que le meilleur rendement est attribué à la couche caractérisée par la plus faible taille des nanocristallites.

Conclusion

Les résultats de la simulation obtenus par l'étude théorique menée dans ce chapitre ont montré que le rendement est fortement dépendant, d'une part du dopage de la couche, et d'autre part de la morphologie de la couche en termes de taille des cristallites. En effet la couche dont la taille des cristallites est de 2nm a permis l'obtention du rendement le plus élevé.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail est consacré à l'étude théorique par utilisation du logiciel PC1D d'une cellule photovoltaïque de troisième génération à base d'une hétérojonction constituée d'une couche de silicium nanocristallin de type p et d'épaisseur 150 nm déposée sur un substrat de silicium monocristallin de type n. L'étude a été réalisée en fonction des concentrations du dopage de la couche nanocristalline et de la taille moyenne des nanocristaux de silicium.

L'état de l'art réalisé dans ce travail de mémoire a montré les avantages du silicium nanocristallin dans l'amélioration des rendements des cellules de troisième génération. En effet, ce rendement peut être ajusté en optimisant entre autres la taille moyenne des nanocristaux de silicium formant la couche qui influence considérablement l'énergie de gap et l'indice de réfraction de la couche.

Les résultats de simulation ont montré qu'à partir d'une densité de dopage de 10^{19} cm^{-3} le rendement de la cellule diminue d'une manière drastique pour les trois tailles des nanocristaux considérées à savoir, 6nm, 4 nm et 2 nm. Le meilleur rendement en l'occurrence 20.6% a été obtenu pour un dopage de 10^{19} cm^{-3} et une taille moyenne des nanocristaux de 2 nm.

En perspective, nous proposons le développement d'un modèle analytique traitant ce type de cellules photovoltaïques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **A. Corinne** « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie ». Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Université Paul Sabatier Toulouse III, 2003.
- [2] **A. C. Pastor.** « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques ». Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [3] **B. Brousse.** «Réalisation et caractérisation de cellules photovoltaïques organiques obtenues par dépôt physique ».Thèse de doctorat, Limoge, 2004.
- [4] « L'effet photovoltaïque », BP SOLAR, décembre 2000.
- [5] La filière photovoltaïque, « l'hydrogène, les nouvelles technologies de l'énergie », Clefs N° 50/51, 2004/2005.
- [6] **R. Forsr.** « Photovoltaic effect: Diode I-V Characteristics, Solid State Physics ».Thèse de magister en énergétique et mécanique des fluides.Université Ferhat Abbas-Setif.January 31, 2006.
- [7] **B. Equer,** Energie solaire photovoltaïque, volume1, Ellipses Edition Marketing et l'Unesco, 1993.
- [8] **H. Mammar** « Effet des structures nanométriques sur le développement des cellules photovoltaïques de troisième génération » Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, Algérie, 2018.
- [9] **N. Nehaoua** « Détermination des paramètres d'une photopile solaire a jonction PN » mémoire Magister , Université Ferhat Abbas-SETIF, Algérie,2018.-
- [10] **S. Zeghina** «Simulation et analyse d'une cellule solaire organique » Université de Batna, Algeria, 2013.
- [11] **D. Kovalev, M. Fujii.** « Silicon Nanophotonics Basic Principles, Present Status and Perspectives ».Pan Stanford Publishing, 2009.

- [12] **C. Bonafos, B. Colombeau, and A. Altibelli.** « Kinetic study of group IV nanoparticles ion beam synthesized in SiO₂. ». Nuclear Instrument and Methods. B. vol. 178, p 17-24, 2001.
- [13] **T. Baron, F. Martin, P. Mur, C. Wyomb, and M. Dupuyb :** « Silicon quantum dot nucleation on Si₃N₄ SiO₂ and SiO₈N_y substrates for nanoelectronics devices». J. Cryst. Growth. vol. 209, p 1004-1008, 2000.
- [14] **H. Seifarth, J. U. Schmidt, R. Grotzschel, M. Klimenov.** «Phenomenological model of reactive rf magnetron sputtering of Si in Ar O₂ atmosphere for the prediction of SiO₈ thin film stoichiometry from process parameters», Thin Solid Films, Vol. 382, p 108-115, 2001.
- [15] **L. Levoska, M. Tyunina, S. Leppavuori** «Laser ablation deposition of silicon nanostructures». Nanostruct Master, vol. 12, p 101-106, 1999.
- [16] **T. Seto, T. Orii, M. Hirasawa, N. Aya** «Fabrication of silicon nanostructured films by depletion of size selected nanoparticles generated by pulsed laser ablation». Thin Solid Films, Vol. 437, 2003, p. 230-234.
- [17] **R.E. Hummel, M.H Ludwing:** «Spark processing – A novel technique to prepare light-emitting, nanocrystalline silicon». J. Lumin. Vol. 686, 2002, p. 69-76.
- [18] **F. Huisken, B. Kohn, V. Paillard,** «Structured films of light emitting silicon nanoparticles produced by cluster beam deposition», Appl. Phys. Lett. Vol. 74, 1999, p.3776-3778.
- [19] **M. Ostraat, J. De Blauwe** «Futur silicon nanocrystal nonvolatile memory technology», Materials research society proceedings, Vol. 686, 2002.
- [20] **L. Tsybeskov, K.D. Hirrschman, S.P. Duttagupta,** «Fabrication of nanocrystalline Silicon Superlattices by controlled Thermal Recrystallization». Phys. Stat. Sol. (a), Vol. 165, 1998, p. 67-77.
- [21] **E. Tranvouez,** «Lithographie par AFM. » Thèse LPM. INSA de Lyon, p. 145, 2005.
- [22] Courtesy of M. Hermle, Fraunhofer ISE 09 Aout 2010, IN «<https://energieplus-lesite.be/techniques/photovoltaique3/types-de-cellules>».
- [23] **R. Bou, A. Brochier, D. Pavat, M. Robin** «Les différentes générations de cellules photovoltaïques ». Université de Grenoble

- [24] **A. Carlos, I. Rey-Stolle**: « Handbook of concentrator photovoltaic technology», John Wiley & Sons Inc., 2016.
- [25] **E.G. Barbagiovanni, D.J. Lockwood, P.J. Simpson, L.V. Goncharova**, « Quantum Confinement in Si and Ge Nanostructures », J. Appl. Phys., 111, 034307 (2012).
- [26] **L.Banyai S.W.Koch**, «semiconductor quantum dots », world scientific series on atomic Molecular and optical physics, Vol2 (1993).
- [27] **R. Tsu, L. Ioriatti, J. F. Harvey, H. Shen, R. A. Lux**, «Quantum Confinement effects on the Dielectric Constant of Porous Silicon», Materials Research Society Symposia Proceedings, Vol. 283, 437–440, 1993.
- [28] **A. D. Yoffe**, «Low-dimensional systems: quantum size effects and electronic properties of semiconductor microcrystallites (zero-dimensional systems) and some quasi-twodimensional systems», Advances in Physics, Vol. 42, 173–262, 1993.
- [29] **K. Rajkanan, R. Singh, J. Shewchun**. «Absorption coefficient of silicon for solar cell calculations», Solid-State Electron., Vol. 22, p. 793. 1979.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude par utilisation du logiciel PC1D d'une cellule photovoltaïque en hétérojonction avec une couche nanocristalline de silicium déposée sur un substrat du silicium monocristallin. L'étude a été menée en fonction du taux de dopage de la couche active ainsi que de la taille des nanocristallites de la couche en question. Les différents résultats de simulation ont mis en évidence qu'à partir d'une densité de dopage de 10^{19} cm^{-3} le rendement de la cellule diminue d'une manière significative pour les trois tailles des nanocristaux considérées dans ce travail en l'occurrence, 6nm, 4 nm et 2 nm. Le rendement optimal à savoir 20.6% a été obtenu pour un dopage de 10^{19} cm^{-3} et une taille moyenne des nanocristaux de 2 nm.

Absatact

The work concerns the study of a heterojunction photovoltaic cell with a silicon nanocrystalline layer deposited on a substrate of monocristalline silicon by using PC1D software. The study was conducted based on the doping ratio of the active layer as well as the size of the nanocrystallites of nanocrystalline silicon layer. The different simulation results shown that from a doping density of 10^{19} cm^{-3} the cell efficiency decreases significantly for the three sizes of the nanocrystals considered in this work , i.e 6nm, 4nm and 2nm. The optimum efficiency, namely 20.6%, was obtained for a doping of 10^{19} cm^{-3} and a nanocrystallites average size of 2 nm

المخلص

العمل المقدم في هذه المذكرة يتعلق بالدراسة لخلية كهروضوئية غير متجانسة مع طبقة بلورية نانوية من السيليكون المترسبة على ركيزة من السيليكون أحادي البلورية باستخدام برنامج PC1D. أجريت الدراسة وفقاً لمعدل التطعيم للطبقة النشطة بالإضافة إلى حجم البلورات النانوية في الطبقة المعنية. أظهرت نتائج المحاكاة المختلفة أنه من خلال كثافة التطعيم البالغة 10^{19} سم^{-3} تنخفض مردودية الخلية بشكل كبير بالنسبة للأحجام الثلاثة للبلورات النانوية التي تم النظر فيها في هذا العمل ، وهي 6 نانومتر و 4 نانومتر و 2 نانومتر. تم الحصول على المردود الأمثل ، وهو 20.6% ، والموافق لكثافة التطعيم 10^{19} سم^{-3} ومتوسط حجم البلورات النانوية 2 نانومتر.