

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ibn Khaldoun – Tiaret

Faculté des Sciences et de la Technologie et Sciences de la Matière

Département de Sciences de la Matière



Mémoire

Présenté par :

Mr NATECHE KHALIFA

Pour obtenir le diplôme de

Master

Filière : physique

Spécialité : Energie solaire

Sujet :

**Etude d'une cellule photovoltaïque à base de Si et
SiGe**

Soutenu le :24/06/2012

Devant le jury:

Mr. B.BENRABEH	MCA	Président	U.Tiaret
Mr.KH.YANNALAH	MCA	Examineur	U. Tiaret
Mr. A.KADARI	MAB	Examineur	U.Tiaret
Mr. A. DEHBI	MCA	Directeur de mémoire	U.Tiaret

Remerciements

Même si le projet de le mémoire de Master , beaucoup de personnes contribuent à son succès, grâce à leur soutien, leur conseil ou tout simplement leur bonne humeur. Arrivant au terme de cette thèse, je voudrais remercier toutes ces personnes qui ont eu une grande influence sur ma vie .

Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements aux membres du jury, qui ont accepté d'évaluer ce travail.

J'aimerais surtout exprimer ma gratitude à mon directeur de mémoire, ABDELKADER DEHBI pour m'avoir donnée l'opportunité de travailler et tout ce que je peux dire c'est MERCI. Leur encadrement de qualité et leur disponibilité permanente m'ont beaucoup servie.

Je tiens également à remercier KHADIR NAWAL pour leur façon très particulière de 'motiver' et 'remonter le moral'. Leurs remarques et commentaires m'ont beaucoup appris.

Je tiens enfin à remercier les collègues et mes amis, YASSINE ,BRAHIM ,ALI

Un grand merci à toute ma famille qui a toujours été présente lorsque j'en ai eu besoin, en particulier à maman, papa

Sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : généralité sur la cellule photovoltaïque	
I.1.Généralité	4
I.1.1.Historique	4
I.1.2.Introduction.....	4
I.2.1. Système photovoltaïque.....	5
I-2.2. Description de la structure d'une cellule solaire.....	6
I-2.3.Absorption et réflexion de la lumière	6
I-2.4.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	9
I.2.5.Paramètres des cellules photovoltaïques	10
I.2.6. Caractéristique courant tension et schéma équivalent	11
I.2.7. Rendement de conversion η	13
I.3.Courant d'éclairement	13
I.3.1 Région quasi neutre de type N.....	13
I.3.2 Région quasi neutre de type P.....	14
I.3.3 Région de charge d'espace.....	14
I-4.Mécanismes de génération et de recombinaison des porteurs	15
I-4.1.La recombinaison.....	15
I-4.1.1.La recombinaison bande à bande	15
I-4.1.2. La recombinaison par pièges	16
I-4.1.3 La recombinaison Auger	16
I-4.2. La génération	17
I-5. Différents matériaux photovoltaïque	17
I-5.1.Nouvelles structures photovoltaïques.....	18
I-5.2. Cellule photovoltaïque conventionnelle	19
I-5.3.Cellule à BSF	20

Sommaire

I-5.4.Cellule noire (Non reflecting cell)	21
I-5.5.Structure PERL	21
I-5.6.Photopiles en films minces	22
I-5.7.Cellule solaire de type Schottky	23
I-5.8.Cellule solaire de type structure MIS	25
I.6.La partie utilisation	25
I.6.1.Contrôle d'énergie	25
I.7.Rappel : Les semi-conducteurs	25
I.7.1.La jonction N-P.....	27
I.7.2.Facteurs limitation de rendement d'un générateur photovoltaïque.....	29
I.7.2.1.Influence de la résistance série R_s	29
I.7.2.2.Influence de la résistance parallèle R_{sh}	30
I.7.3. Association des cellules photovoltaïques.....	30
I.7.3.1 Association en série.....	30
I.7.3.2.Association en parallèle.....	30
I.7.3.3.Association hybride (en série et en parallèle)	31
I.8 Conclusion.....	32
CHAP II matériaux et outil pour l'analyse des cellules PV	
II.1 Introduction	34
II.2.Propriété physique du silicium et du germanium	34
II.2.1. Hauteur de la bande interdite	34
II.2.2. La conductivité	36
II.2.3. Les masses effectives	37
II.2.4. Tableau des propriétés physiques du Si et Ge	38
II.3. Propriété générale de l'alliage Si-Ge	38
II.3.1. Le SiGe massif	39
II.3.1.1. Structure cristalline	39
II.3.1.2. Bandes d'énergies	41
II.3.1.3. Propriétés optiques	43
II.3.2. Le SiGe contraint sur Silicium	45
II.3.2.1. Structure, contrainte et stabilité	45
II.3.2.2. Réduction de la bande interdite	46
II.4. Logiciel de simulation : PC1D	46

Sommaire

II.4.1. Aperçu du logiciel	46
II.4.2. Les paramètres du dispositif (Device)	47
II.4.3. Les paramètres des régions	48
II.4.4. Les paramètres d'excitation	48
II.4.5. Les résultats	49
II.5. Conclusion.....	49
CHAP III Simulation des cellules solaires a base deSi et SiGe	
III.1. Simulation des cellules solaire à base de silicium	51
III.1.1. Paramètres de simulation	51
III.1.2. Résultats de la simulation.....	52
III.1.2.1. Caractéristique I-V	53
III.1.2.2. Réponse spectrale	53
III.2. Simulation des cellules solaire à base de germanium.....	55
III.2.1. Paramètres de simulation	55
III.2.2. Résultats de la simulation.....	56
III.2.2.1. Caractéristique I-V	56
III.2.2.2. Réponse spectrale	57
III.3. Simulation des cellules solaire à base de SiGe.....	58
III.4. Conclusion.....	62
III. Conclusion générale	63

Introduction générale

Introduction générale :

Depuis très longtemps, l'homme a cherché à utiliser l'énergie émise par le soleil. La plupart des utilisations sont directes comme en agriculture, à travers la photosynthèse, ou dans les diverses applications de séchage et chauffage, autant artisanale qu'industrielle.

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, la quantité restante demeure encore importante quand elle arrive au sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m² crête dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m², lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau [I-2]. Le flux solaire reçu au niveau du sol dépend de :

- L'orientation, la nature et l'inclinaison de la surface terrestre,
- La latitude du lieu de collecte, de son degré de pollution ainsi que de son altitude,
- La période de l'année,
- L'instant considéré dans la journée,
- La nature des couches nuageuses.

Ainsi, il existe des zones dans le monde plus favorisées que d'autres du point de vue ensoleillement. Elles sont répertoriées sous forme d'atlas et mettent en évidence des «gisements solaires». Les principaux phénomènes physiques évoqués sont des paramètres à prendre en compte pour l'installation et la maintenance de générateurs photovoltaïques.

En effet, le comportement de ces générateurs d'énergie s'avère plus ou moins aléatoire, en fonction du site de mise en fonctionnement. Ainsi, si l'on considère des zones à climat sec et possédant un taux d'ensoleillement important dans l'année, le flux solaire peut être facilement modélisable et prévisible en fonction des heures de la journée et des jours de l'année. Le fonctionnement des générateurs PV est alors souvent proche de celui estimé.

Si, au contraire, on considère des zones plus défavorables, souvent ventées et présentant un temps nuageux alternant avec des périodes d'ensoleillement sur plusieurs

Introduction générale

jours par an, l'irradiation change rapidement et dans de larges proportions. Il est alors difficile de faire des prédictions fines sur le taux d'irradiation sur un lieu et une heure précise.

Dans ce cas très défavorable, l'exploitation du gisement solaire devient plus difficile par des générateurs PV, qui doivent tenir compte de cette réalité.

De même, prenons le cas d'un site présentant des zones d'ombres liées à des infrastructures ou des reliefs naturels. Le comportement du générateur PV ne va plus être homogène et va souvent présenter des comportements dégradés qu'il faudra soit éviter, soit prévenir. La production d'énergie est dans ce cas souvent bien dégradée. Enfin, il ne faudra pas négliger des changements brutaux de point de fonctionnement directement liés au comportement de la charge sur laquelle le générateur PV doit débiter. Ce dernier point peut en effet entraîner un fonctionnement du générateur PV bien en deçà de son point nominal si la charge est mal adaptée.

Ces premiers constats montrent que l'exploitation d'une énergie comme le photovoltaïque peut s'avérer complexe et inefficace sans une bonne connaissance des conditions d'exploitations.

Dans un premier chapitre, généralité sur la cellule photovoltaïque. Puis, nous montrons les différents types de recombinaison dans la cellule localisés en surfaces et en volume.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude des différents types de silicium et les étapes à suivre pour obtenir du silicium de qualité électronique. Puis, nous présentons les propriétés physiques du silicium et du germanium que nous utilisons dans la simulation numérique.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les propriétés générales de l'alliage $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. Dans lequel nous présentons quelques notions de base du $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ainsi que sa structure de bande.

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

Chapitre I : généralité sur la cellule photovoltaïque

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

I.1.Généralité :

I.1.1.Historique :

En 1839, Antoine-César Becquerel constate les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile.

En 1905, Einstein découvre que l'énergie de ces quanta de lumière est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante. Le domaine spatial a besoin d'une énergie sans combustible embarqué. La recherche s'intensifie sur le photovoltaïque.

En 1954 est créée par les laboratoires BELL la première cellule photovoltaïque avec un rendement de 4%.

Le spatial devient le banc d'essai de la technologie photovoltaïque. Les coûts de fabrication élevés des cellules et leurs rendements médiocres ne leur permettent pas encore une exploitation à grande échelle. Il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque. [1]

I.1.2.Introduction :

Le mot « photovoltaïque » vient du grec « photos » qui signifie lumière et de « Volta » du nom du physicien italien qui en 1800 découvre la pile électrique.

L'énergie solaire photovoltaïque convertit directement le rayonnement lumineux (Solaire ou autre) en électricité. Elle utilise pour ce faire des modules photovoltaïques composés de cellules solaires ou de photopiles qui réalisent cette transformation d'énergie. La conversion photovoltaïque a été réalisée pour la première fois dans le laboratoire Bell² en 1954 sur une simple jonction P-N au Silicium. Par suite, plusieurs semi-conducteurs ont été utilisés pour cet objectif.

L'application terrestre et spatiale de ces matériaux en photovoltaïque dépend fortement de leurs propriétés optoélectroniques et thermiques. Ces deux applications sont très importantes, notamment, l'application spatiale pour alimenter les satellites en électricité utilisés dans plusieurs domaines (télécommunication, militaires, météorologie,...). L'application terrestre ayant ainsi un impact important sur l'éclairage des routes désertiques, les signalisations dans les ports. L'alimentation des habitations et des radars isolés.

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques ou photopiles sont des dispositifs de conversion d'énergie de la lumière. Trois processus élémentaires interviennent dans l'effet photovoltaïque :

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques.
- La collecte des charges.

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion photovoltaïque. Jusqu'à l'année 1976, époque où les premières jonctions ont vu le jour, le principal matériau à utilisation photovoltaïque était le Silicium monocristallin. Les Jonctions réalisées grâce à ce matériau permettent en effet de transformer les photons en un courant électrique avec des rendements de conversion η qui sont à l'heure actuelle, de l'ordre de 15% au niveau industriel, mais qui ont atteint 20% dans le laboratoire. Comme le Silicium monocristallin, des composés tels que le GaAs ont abouti à des rendements assez importants (plus qu'un quart de la puissance incidente est convertie par des cellules à base de GaAs), ainsi que des rendements de plus de 30% ont été obtenus grâce à des cellules multi-jonctions (tandems solaires).[2]

I.2.1. Système photovoltaïque :

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt.

Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnel à la surface du module.

L'interconnexion de modules entre eux en série ou en parallèle pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de champ photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif.

Le système photovoltaïque est alors l'ensemble du générateur photovoltaïque et des équipements de consommation.

I-2.2. Description de la structure d'une cellule solaire :

La première structure de la cellule solaire était très simple. Elle était incapable d'offrir des performances élevées et de délivrer une puissance satisfaisante aux charges. Elle avait aussi beaucoup d'inconvénients et des pertes importantes soit par réflexion, soit par les contacts ohmiques et par la recombinaison. Cette structure a subies plusieurs modifications. La structure actuelle tient à optimiser les performances de la structure classique. Elle est constituée de plusieurs couches, l'élément de base de ces structures est la jonction P-N, elle joue le rôle principal dans le dispositif solaire, et elle est le siège de la génération des porteurs et de leurs séparations. Pour que la pile solaire soit utile, et pour que l'électricité qu'elle produise passe convenablement dans la charge, la grille doit avoir une forme spéciale afin que la surface active de la cellule ne soit pas occultée.

Quand la lumière du soleil traverse le verre et l'adhésif, elle rencontre une couche antireflet (ARC). Cette couche est également transparente, elle réduit la quantité de lumière du soleil réflétée par la cellule. Sans ARC, la pile solaire agit comme un miroir et reflète jusqu'à 30% de la lumière frappant la cellule. L'ARC réduit au minimum cette réflexion, en ramenant les pertes de réflexion à moins de 5% de sorte que la lumière du soleil va atteindre la surface de la cellule et diminuer les pertes optiques.

La couche extérieure de la cellule est en verre pour protéger la structure contre l'environnement. Il est attaché au reste de la cellule avec un adhésif transparent. Les deux régions principales de la jonction sont appelées respectivement émetteur et base.

I-2.3. Absorption et réflexion de la lumière :

L'absorption de la lumière par le matériau solaire étant sans doute le mécanisme principal du phénomène de la génération, la majorité des semi-conducteurs de base

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

des cellules solaire absorbe convenablement le spectre visible. En effet, on utilise toujours les semi-conducteurs ayant un coefficient d'absorption élevé.

Le taux de l'absorption des photons par un matériau semi-conducteur est lié directement aux énergies des photons incidents

L'absorption n'a lieu que si l'énergie des ces photons est égale ou est supérieure à l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur E_g . Les photons qui satisfont pas cette condition ($E_{ph} < E_g$) ne seront pas absorbés et ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque. Que se passe-t-il s'il y a une énergie supérieure à E_g ? Le photon 2 du diagramme I-1-b génère une paire électron- trou à un niveau supérieur, mais l'excédent est perdu par un processus de désexcitation spontanée qui produit de la chaleur et ramène son énergie à E_g . Donc quelle que soit son énergie, pourvu qu'elle soit supérieure à E_g , chaque photon absorbé ne crée qu'une seule paire électron – trou.

Le phénomène de la réflexion est l'un des problèmes qui impose la meilleure conversion d'énergie. Ces pertes affectent principalement le courant de court circuit de la pile solaire. Généralement, la lumière se perd en deux formes, soit par réflexion, soit par transmission.

Dans une structure photovoltaïque, les trois niveaux suivants de la réflexion sont responsables des pertes optiques.

- 1) Réflexion par les contacts ohmiques.
- 2) Réflexion par la surface avant du semi-conducteur.
- 3) Réflexion par la couche arrière (BSR).

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

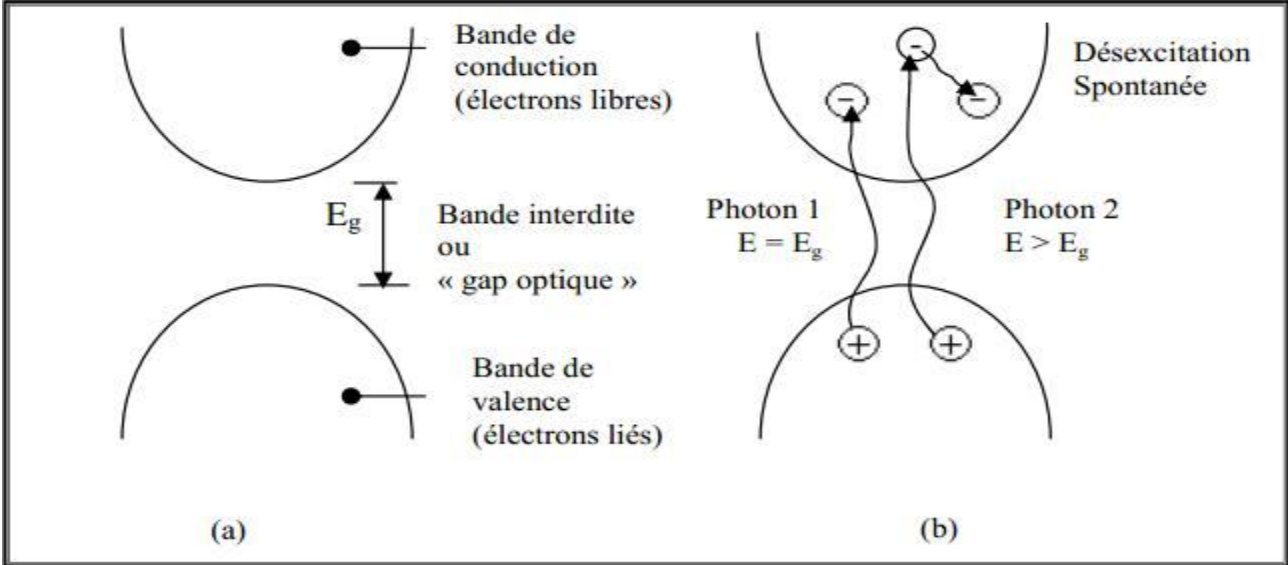


Figure I-1 Diagramme d'énergie d'un semi-conducteur
 a)- Dans l'obscurité. b)- Sous illumination.

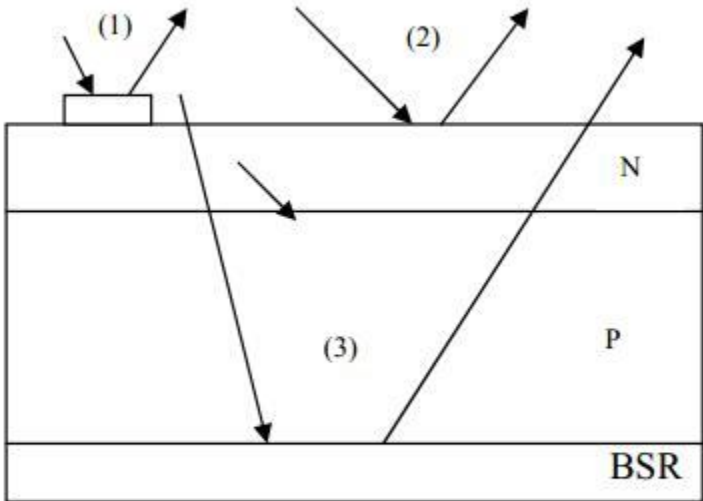


Figure I-2 Les trois niveaux de la réflexion.

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

I-2.4.Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule solaire se compose d'un certain nombre de couches, généralement deux couches principales, l'une est constitué d'un semi-conducteur de type N et l'autre de type P et inversement. C'est à la jonction ou interface métallurgique de ces deux couches que la cellule produit de l'électricité, celle ci est un élément très important dans l'optoélectronique . Ces semi-conducteurs sont des matériaux électroniques spéciaux, sensibles à la lumière, ayant deux propriétés principales pour produire l'électricité :

- Quand la lumière est absorbée, des électrons seront libérés dans le semi-conducteur et contribuent au courant.
- Lorsque les deux semi-conducteurs constituent une jonction, un champ électrique s'établit.

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire est illustré sur la figure (I-3).

Les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions 1,2 et 3. Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création. Dans les zones électriquement neutres P et N, les photo-porteurs minoritaires diffusent. Ceux qui atteignent la région de charge d'espace sont propulsés par le champ électrique vers la région où ils deviennent majoritaires. Ces photo-porteurs contribuent donc au courant par leur diffusion, ils créent un photo-courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons trous créés par les photons sont dissociées par le champ électrique, l'électron est propulsé vers la région de type n et le trou vers la région de type P. Les porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour créer un photo-courant résultant J_{ph} qui contribue au courant inverse de la diode . [1]

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

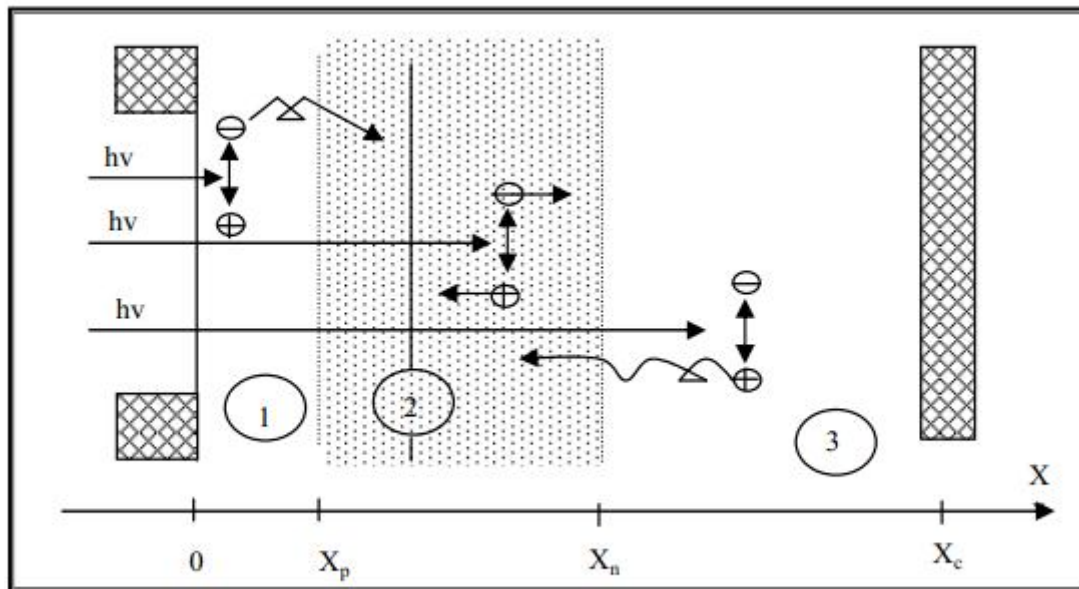


Figure I-3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.2.5. Paramètres des cellules photovoltaïques :

Une cellule solaire est constituée par une jonction PN, lorsque la surface libre est éclairée les photons d'énergies supérieures à la largeur de la bande interdite E_g peuvent exciter des paires électron-trou dans les régions quasi neutres P et N figure I-6. Les électrons et les trous créés respectivement dans les régions P et N diffusent et atteignent la zone de charge d'espace, accélérés par le champ électrique interne, ils traversent la zone de transition.

La région N reçoit des électrons et se charge négativement ; la région P accepte des trous et se charge positivement. Si on relie les cotés de la jonction à une charge R_c , un courant I la parcourt et une différence de potentiel apparaît:

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

$$I = I_{ph} - I_d(V) \quad (I.12)$$

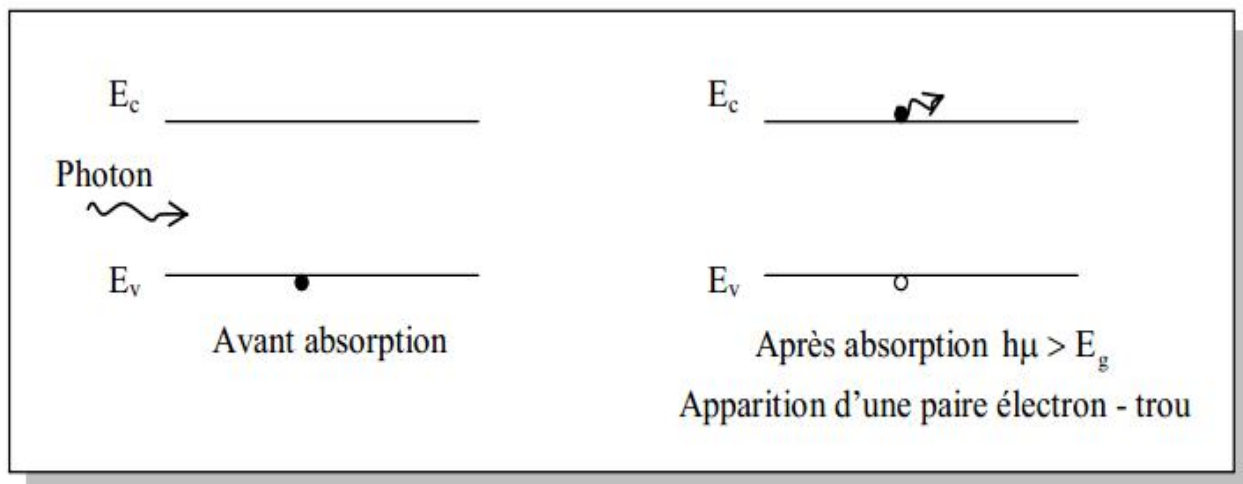


Fig. (I. 4): création de paire électron trou par photo excitation

Avec :

I_{ph} : le photocourant

$I_d(V)$: courant d'obscurité de la diode

Cette relation entre les trois grandeurs, I , I_{ph} et $I_d(V)$

représente la caractéristique courant

tension idéale permettant de déterminer quatre grandeurs caractéristiques principales du fonctionnement des cellules solaires :

- Le courant de court-circuit I_{cc} ;
- La tension en circuit ouvert V_{oc} ;
- Le facteur de forme FF ;
- Le rendement de conversion d'énergie η [3]

I.2.6. Caractéristique courant tension et schéma équivalent :

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant tension. Le

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

panneau photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance. On s'aperçoit alors de l'existence d'un point P_m où la puissance se trouve être maximale. Il est sans aucun doute intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Certains régulateurs solaires réalisent donc une adaptation d'impédance pour qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)). La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la figure I-5. Les valeurs respectives des divers éléments du schéma équivalent déterminent les performances de la cellule réelle. [4]

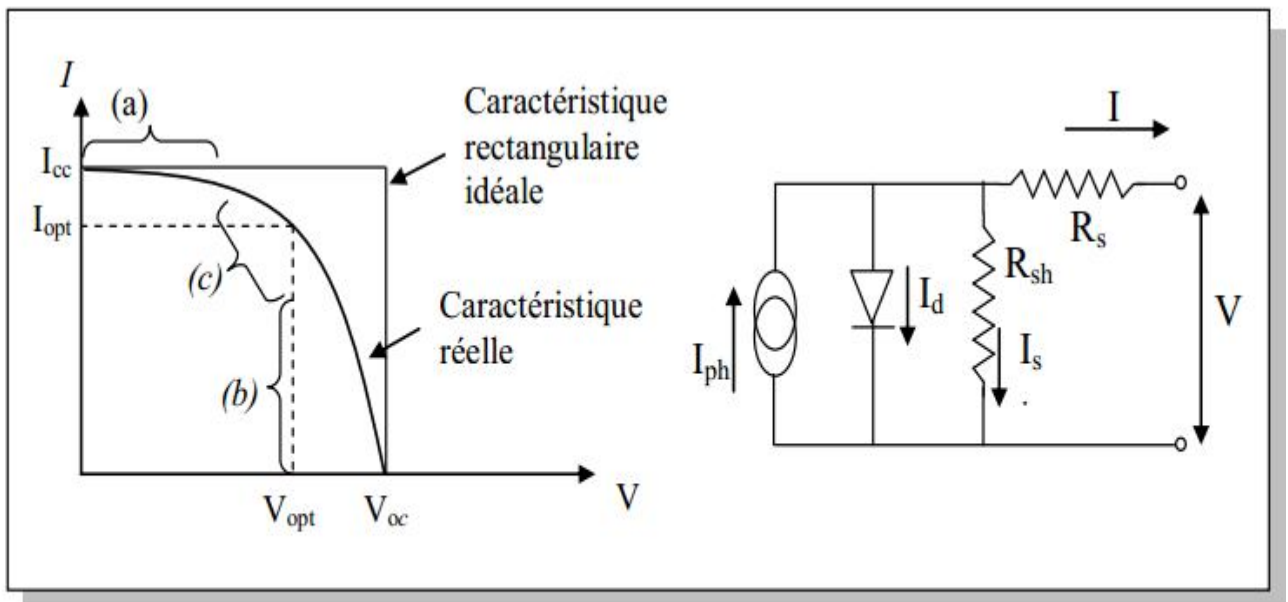


Fig. (I.5) : Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

La caractéristique se divise en trois parties :

- La zone (a) où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} proportionnel à l'éclairement,
- La zone (b) où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{co} ,
- La zone (c) où l'impédance interne du générateur varie rapidement.

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

I.2.7. Rendement de conversion η :

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

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{ff.V_{oc}.I_{cc}}{P_{in}} \dots\dots\dots Eq (I.1)$$

P_{in} : Puissance incidente = P solaire = 100 W/cm²

La densité de puissance incidente égale à P_{in}/A

A : section de la cellule

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

I.3.Courant d'éclairement :

Soient les dimensions de la cellule citées dans la figure (I.8) [5]

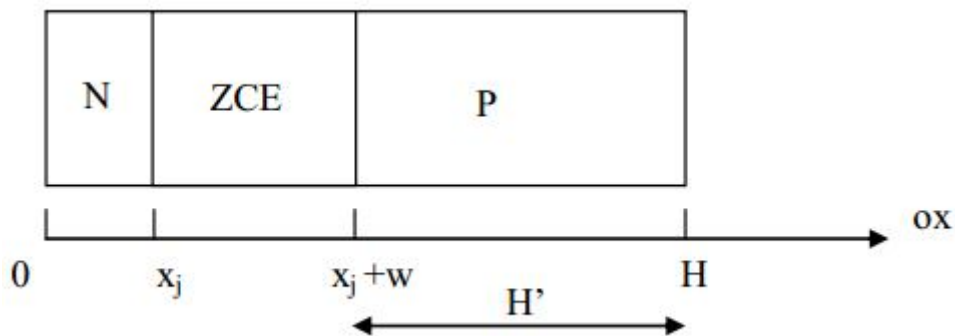


Fig. (I.8) : Dimensions de la cellule solaire

I.3.1 Région quasi neutre de type N

La densité de courant des trous est

$$J_p = q p \mu_p E - q D_p d\Delta p/dx \dots\dots\dots Eq (I.2)$$

$$E = 0$$

$$J_p = -q D_p d\Delta p/dx \dots\dots\dots Eq (I.3)$$

Avec

$$\Delta p = p_n - p_{n0} \dots\dots\dots Eq (I.4)$$

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

L'équation de continuité est :

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} - \frac{\Delta p}{\tau_p} + G = 0 \dots \dots \dots \text{Eq(I.5)}$$

I.3.2 Région quasi neutre de type P

L'équation de densité de courant des électrons est donnée par :

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx} \dots \dots \dots \text{Eq(I.6)}$$

La densité de courant des électrons devient uniquement du courant de diffusion puisque le champ électrique est nul dans cette zone

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} \dots \dots \dots \text{Eq(I.7)}$$

Avec

$$\Delta n = n_p - n_{p0}$$

L'équation de continuité est:

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} - \frac{\Delta n}{\tau_p} + G = 0 \dots \dots \dots \text{Eq(I.8)}$$

I.3.3 Région de charge d'espace

Le flux de photons à la profondeur x dans le matériau est :

$$\Phi(\lambda, x) = y(\lambda) \Phi_0(\lambda) (1 - R(\lambda)) \exp(-\alpha(\lambda)x) \dots \dots \dots \text{Eq(I.9)}$$

$\Phi(\lambda, x)$: Flux incident de longueur d'onde $\lambda = 1.24/E(\text{ev})$

R : coefficient de réflexion

$$R = \left[nr - \frac{1}{nr} + 1 \right]^2 \dots \dots \dots \text{Eq(I.10)}$$

n : indice de réfraction

Le taux de génération de paires électron – trou est égal au taux de dispersion de photons.

$$G(\lambda, x) = -y(\lambda) \frac{d\Phi}{dx} \dots \dots \dots \text{Eq(I.11)}$$

$$G(x) = (1 - R) \Phi_0 \alpha \exp(-\alpha x) \dots \dots \dots \text{Eq(I.12)}$$

$\alpha(\lambda)$: coefficient d'absorption

x : profondeur d'absorption

g(l) : est le rendement quantique, il représente le rapport entre le nombre de paire électron- trou créés et le nombre de photons absorbés.

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

I-4.Mécanismes de génération et de recombinaison des porteurs :

I-4.1.La recombinaison :

La recombinaison des électrons et des trous est un processus par lequel les deux porteurs s'annihilent, les électrons arrivent et retournent à la bande de valence sous deux formes, soit en une seule étape où par des étapes multiples. Ces sauts se font éventuellement vers des états vides qui sont associés aux trous. Les deux porteurs disparaissent par la suite au cours de ce processus. La différence d'énergie entre l'état initial et final de l'électron est libérée en plusieurs formes.

Ceci même à une classification possible des mécanismes de recombinaison. Dans le cas de la recombinaison non radiative elle transmise à un ou plusieurs phonons, et dans la recombinaison Auger elle est dégagée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron

La recombinaison fait partie d'un processus pour reconstituer l'équilibre d'un semi-conducteur qui a été perturbé, ou mis hors de l'équilibre. Les perturbations peuvent être sous forme de champ électrique appliqué, de changement de la température ou d'exposition à la lumière. La recombinaison se produit généralement quand il y a un excès de porteurs dans un semi-conducteur, elle est liée fortement à cet excès.

Les trois mécanismes de recombinaison sont semblables par le fait qu'ils sont tous pour annihiler les porteurs en excès. [6,7]

I-4.1.1.La recombinaison bande à bande :

Se produit quand un électron arrive de la bande conduction dans l'état vide de la bande de valence associée au trou. Cette transition de bande à bande est en général une transition radiative dans les semi-conducteurs à gap direct. En d'autre terme, c'est l'annihilation d'un électron de la bande de conduction et d'un trou de la bande de valence, ce processus est expliqué par l'attraction de la charge négative de l'électron et de la charge positive du trou qui conduit ces porteurs à l'annulation. L'énergie libérée pendant le processus produit un photon et émet de la lumière. [7,8]

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

I-4.1.2. La recombinaison par pièges :

Se produit quand un électron arrive dans un état d'énergie permis, qu'on appelle « piège ». La force responsable de ce mécanisme se situe dans la bande interdite. Elle est provoquée par la présence d'un atome étranger ou un défaut structural, tel que les macles ou les dislocations. Une fois le piège rempli, il ne peut pas accepter un autre électron, puis l'électron occupant cet état d'énergie de piège va encore faire un deuxième saut vers un état vide dans la bande de valence. On peut envisager ce processus comme une transition en deux étapes d'un électron de la bande conduction à la bande de valence ou comme étapes d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence ou comme disparition de l'électron et du trou qui ne rencontre dans ce piège. Ceci s'appelle la recombinaison indirecte. Dans cette recombinaison non radiative, l'énergie dégagée est transmise à un ou plusieurs phonons. Souvent, elle libère l'énergie thermique ou produit des vibrations du réseau.[6,7,8,9]

I-4.1.3 La recombinaison Auger :

Est un processus dans lequel un électron et un trou se recombinaison dans une transition de bande à bande, mais l'énergie résultante est transmise à un électron ou à un trou différent. La participation d'une troisième particule affecte le taux de recombinaison de sorte que nous devrions traiter la recombinaison Auger différemment de la recombinaison bande à bande.

Généralement la recombinaison provient de la qualité de matériau, des micros défauts, les impuretés métalliques, de la taille de grain et la densité de dislocation. Souvent, dans les cellules solaires épaisses, on néglige la vitesse de recombinaison en surface, en revanche, cette recombinaison a un effet important pour les cellules actuelles, pour une couche mince ou bien une couche ultra mince, autrement dit, les effets en volume dans les couches minces deviennent moins importants que aux en surface.

La recombinaison en surface et en interface du semi-conducteur peut avoir un impact significatif sur le comportement des dispositifs. Ceci est dû au fait que les surfaces et les interfaces contiennent un grand nombre de centres de recombinaison en raison de la non périodicité du cristal à ces endroits. Cette interface comprend un grand nombre de pièges liés aux contraintes de fabrication de dispositif.[10]

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

I-4.2. La 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.

On peut faire une analogie entre les deux processus génération et recombinaison, autrement dit, les trois mécanismes de la recombinaison peuvent être inversés pour créer des porteurs. Il s'agit de la génération bande à bande, intrinsèque, de la génération extrinsèque par l'intermédiaire du niveau de dopage ou bien le piégeage, et la génération Auger.

La génération bande à bande peut se produire quand un électron est sorti directement dans la bande de conduction. Ceci peut se produire par l'absorption de la lumière, photo-génération. Des centres d'impuretés peuvent être utilisés pour la génération, l'électron n'aurait pas besoin autant d'énergie pour atteindre la bande de conduction comme le cas de la génération bande à bande. La génération Auger se produit souvent quand un champ électrique est appliqué. [6,8]

I-5. Différents matériaux photovoltaïque :

Plusieurs matériaux solaires ont été exploités dans la conversion photovoltaïque à cause de leurs propriétés Optoélectroniques. L'évolution de la technologie des semi-conducteurs a permis de synthétiser de nouveaux matériaux tels que les semi-conducteurs binaires, ternaires et quaternaires. Ces composés ayant des avantages différents.[11]

Certes, la première cellule utilisée dans le solaire était à base de silicium. La technologie de ce matériau a évolué rapidement et le silicium peut se trouver sous trois formes : mono cristallin, poly cristallin et amorphe. La fabrication du silicium mono cristallin est très coûteuse [8]. Les meilleures performances de cellules

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

peuvent atteindre un rendement de 15% dans l'industrie et un rendement de 20% en laboratoire.

Les matériaux solaire composés d'un seul élément sont peut nombreux tel que le silicium (Si) et le Germanium (Ge). Les composés binaires sont plus nombreux tels que le GaAs, GaSb, CdTe et JnP. Actuellement, nous trouvons les composés ternaires dans le photovoltaïque, à titre d'exemple, AlGaAs, InGaP. La technologie des matériaux solaires ne s'est pas arrêtée aux composés ternaires, nous trouvons maintenant des composés constitués de quatre éléments, ce sont les composés quaternaires tels que InGaAsP.

Le spectre solaire est très large, les cellules solaires à un seul matériau ne peuvent pas l'exploiter convenablement. Les tandems solaires tels que AlGaAs/Si, GaAs/Ge, CdS/CdTe, InGaP/GaAs et le GaAs/GaSb, permettent une amélioration.

Les différents matériaux sont fabriqués par plusieurs méthodes telles que MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor-Phase Deposition), MBE (Molecular Beam Epitaxy), HMBE (Hydrogen-assisted Molecular Beam), la méthode SPRAY, ainsi que les deux méthodes de fabrication du silicium (wafer), Czochralski (CZ) et zone flottante (FZ).

La fabrication des matériaux solaires est suivie par un traitement thermique.

L'évolution de la technologie du solaire a amélioré la qualité optoélectronique de ces matériaux, notamment du silicium poly-cristallin, sa qualité approche de plus en plus à celle du silicium monocristallin. Notons que la qualité des matériaux solaire est liée fortement aux conditions de fabrication.[12]

I-5.1.Nouvelles structures photovoltaïques :

Les dispositifs photovoltaïques récents tendent à convertir convenablement le maximum de l'énergie lumineuse en électricité et réduire efficacement les pertes électriques et optiques, et optimiser les propriétés des surfaces. Les structures photovoltaïques liées aux exigences technologiques et industrielles, doivent se rapprocher d'une cellule idéale et minimiser les pertes dans les contacts ohmiques, de la réflexion et la recombinaison (amélioration de la qualité cristalline). Dans cette optique, la technologie photovoltaïque a vu plusieurs variantes au niveau des structures solaires ces dernières années grâce aux méthodes d'élaboration et aux techniques de dépôt et du traitement thermique.

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

I-5.2. Cellule photovoltaïque conventionnelle :

La structure photovoltaïque conventionnelle est représentée dans la figure (I-4).

L'exposition de cette configuration au rayonnement solaire va débiter un courant à la charge.

Nous constatons dans la figure (I-4) que la cellule solaire se compose de plusieurs couches telles que les deux zones actives (n et P), une jonction intercalant ces deux régions, d'autres couches à remplir successivement sont aussi nécessaires dans la structure photovoltaïque d'une cellule solaire. Cette structure a besoin de plusieurs améliorations afin de la rendre plus efficace et rentable, dans cette optique nous envisageons ultérieurement quelques structures technologiques.[8]

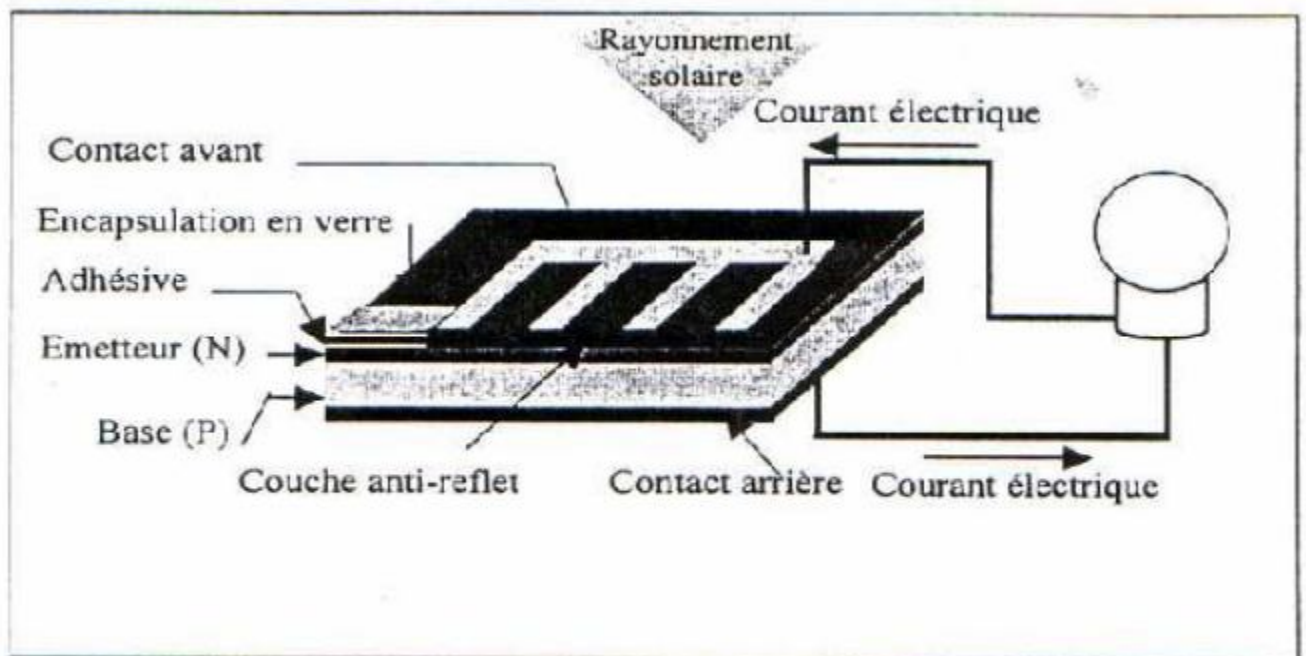


Figure I-4 Structure d'une cellule photovoltaïque conventionnelle

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

I-5.3. Cellule à BSF :

L'interface joue un rôle très important dans la détermination des propriétés optoélectroniques des cellules solaires, parmi ces interfaces le contact face arrière, est un contact ohmique ayant une grande vitesse de recombinaison.

Afin de collecter les paires électron-trou créées par les radiations des grandes longueurs d'onde du spectre solaire, la configuration à champ arrière « BSF » « Back Surface Field ». (Figure I-5) a été proposée. Ce champ améliore les caractéristiques électriques de la cellule solaire, en particulier, la tension en circuit ouvert V_{co} par réduction du courant d'obscurité I_{obs}

En effet, les porteurs devenus minoritaires après leurs injection dans la zone arrière diffèrent en s'éloignant de la zone de déplétion, le champ électrique arrière « BSF » les repousse vers la jonction.

Dans une cellule solaire « BSF » au silicium, la longueur de diffusion et la durée de vie des porteurs minoritaires en excès dans les régions de base sont augmentées.[13]

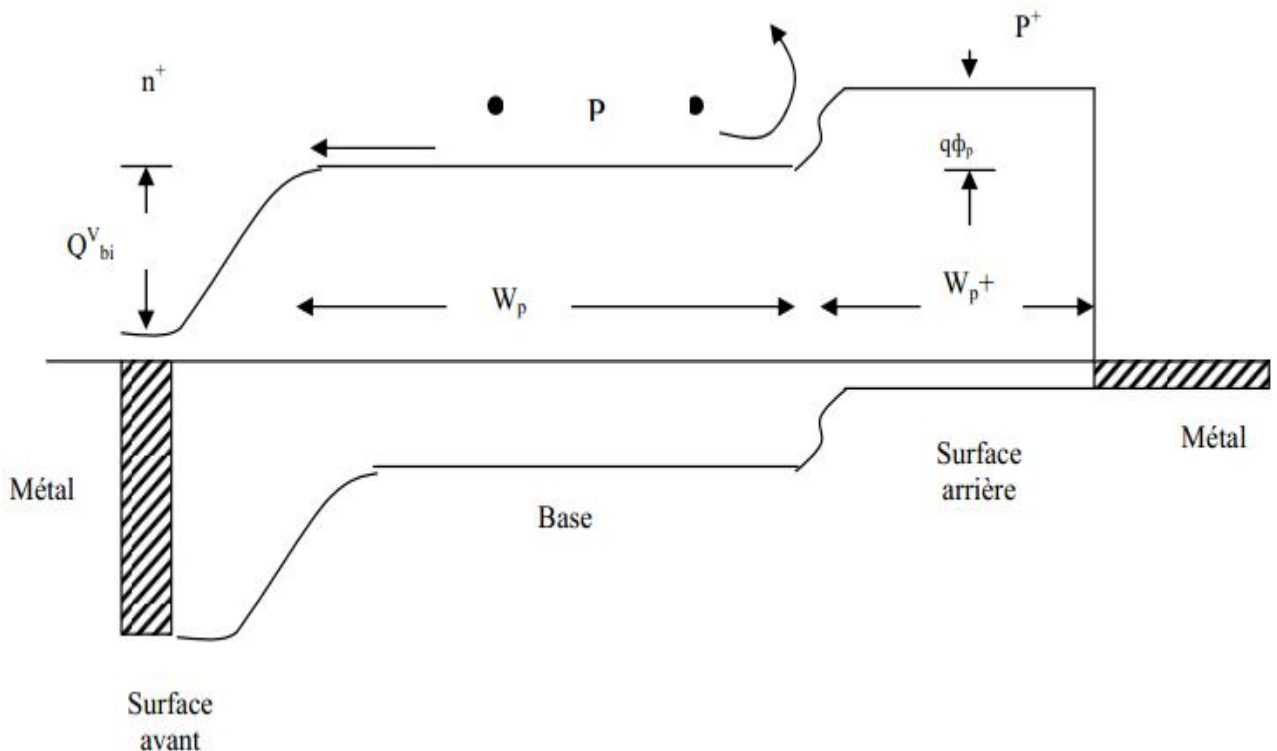


Figure I-5 Diagramme énergétique d'une cellule solaire à couche BSF

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

I-5.4. Cellule noire (Non reflecting cell) :

La cellule noire a une surface très améliorée optiquement, elle absorbe presque toute la lumière (non reflecting), pour cela elle semble noire, la figure (I-6) illustre cette structure.[8]

I-5.5. Structure PERL :

La nouvelle structure PERL a pour but de minimiser au maximum les pertes résistives afin d'optimiser les performances électriques des piles solaires. Les pertes résistives dans les cellules ont limité le rendement d'atteindre ces valeurs optimales.

Les pertes résistives de la structure PERL ont pu être réduites à 50%, ce qui permet aux photopiles d'atteindre des performances de l'ordre de 24% pour le silicium, la figure (I-7).

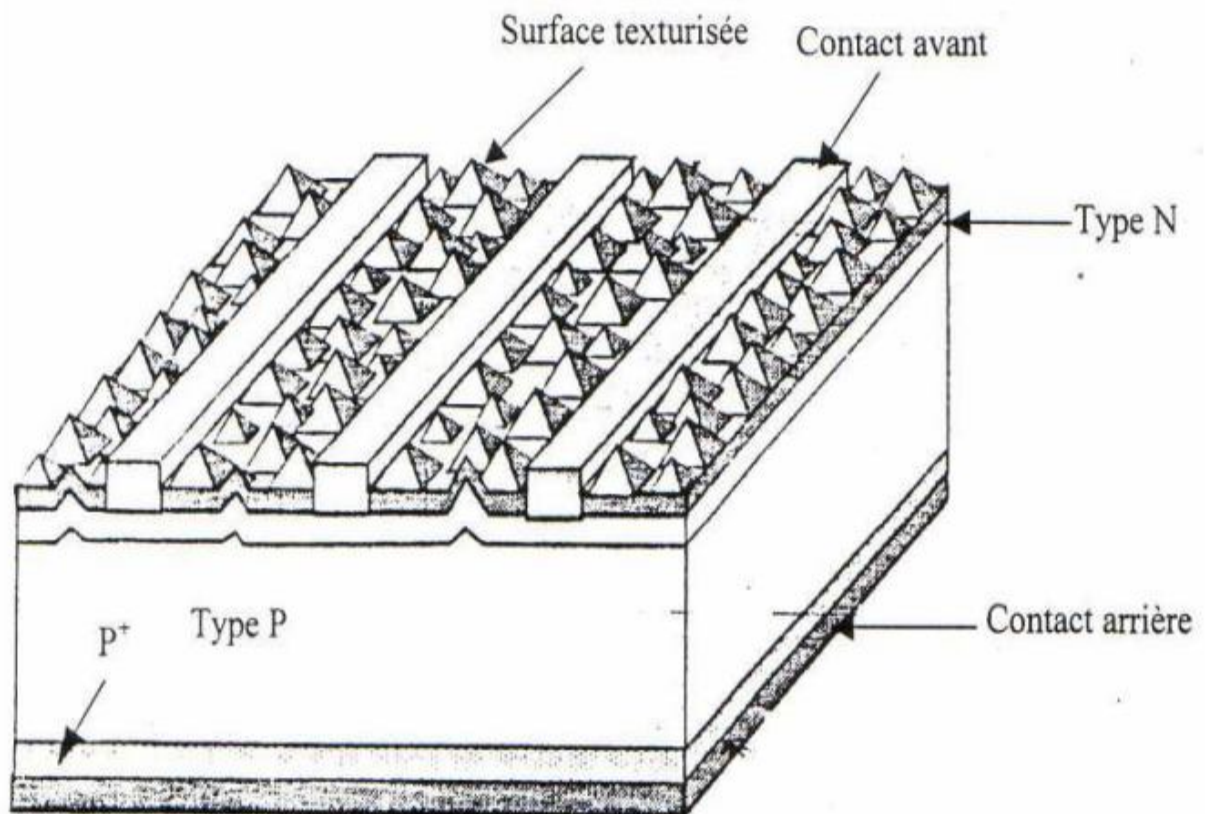


Figure I-6 Cellule noire (nonreflecting cell).

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

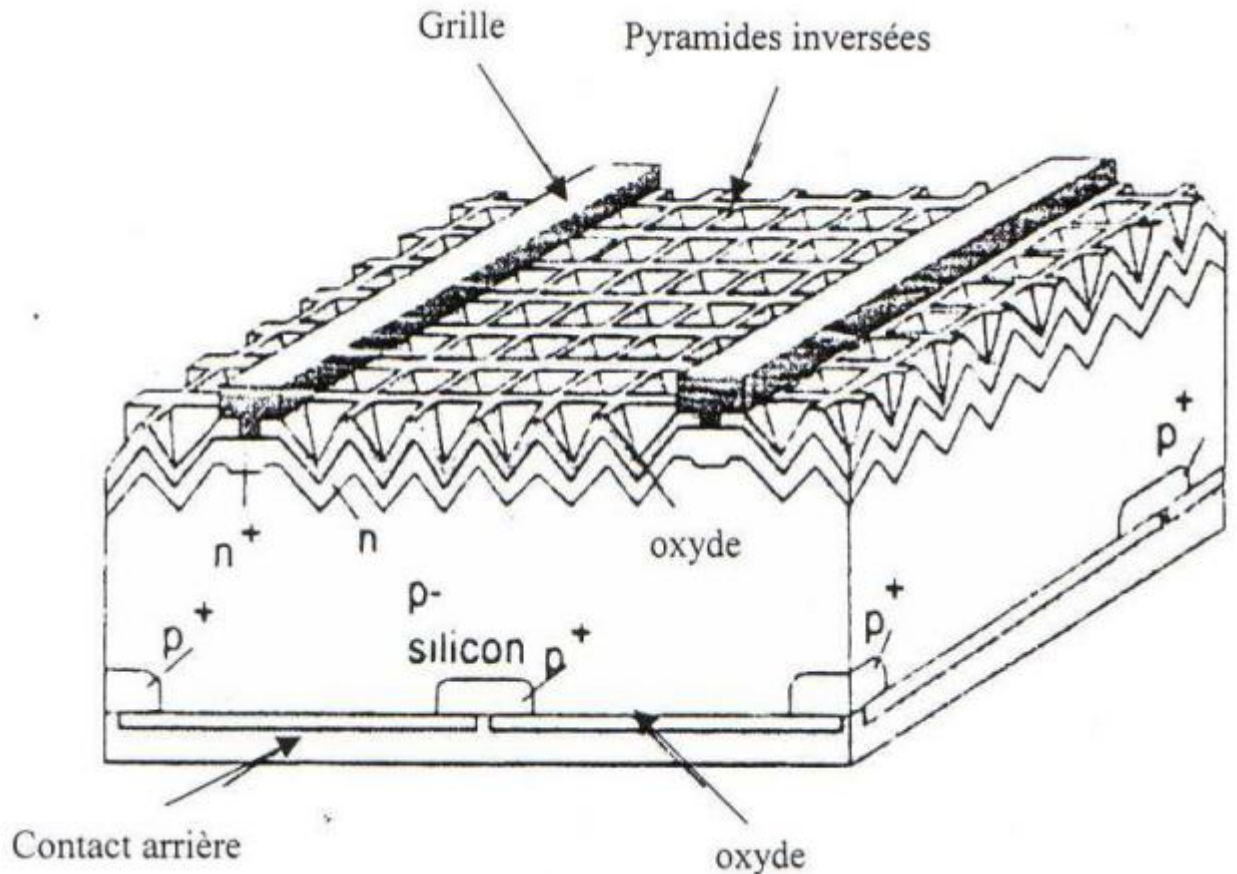


Figure I-7 Structure photovoltaïque PERC

I-5.6. Photopiles en films minces :

La faible consommation de matière, l'élaboration directe du matériau par les techniques de dépôt usuelles sur un matériaux support de faible coût comme le verre, l'acier, céramique, silicium métallurgique ou un polymère sans avoir besoin d'autres étapes de mise en forme coûteuse comme le sciage, font de la technologie en couche mince une solution particulièrement attractive pour les cellules photovoltaïques.

Pour avoir une cellule couche mince, il faut de préférence utiliser des semi-conducteurs ayant une bande électronique interdite directe et de valeur adaptée au spectre solaire de l'ordre de 1.5 [ev]. Si l'épaisseur de la couche semi-conductrice est plus grande que l'inverse du coefficient d'absorption, la plupart de la lumière incidente sera absorbée. Si la longueur de diffusion est plus grande que l'épaisseur du film, la plupart des porteurs photo générés seront rassemblés.

De très nombreux efforts de recherche ont donc été entrepris sur un assez grand nombre de matériaux, depuis une quarantaine d'années, afin d'arriver à des cellules photovoltaïques en couche mince possédant à la fois, un bon rendement de conversion et un faible coût.

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

Historiquement deux matériaux ont été particulièrement étudié et ont fait l'objet d'une industrialisation : le silicium amorphe et le tellure de cadmium (CdTe), tous deux déposés sur verre. Le rendement maximum de ce type de cellules pour des tailles significatives, reste malheureusement limité. Ceci tient à la difficulté d'obtenir ce type de matériaux avec une faible densité de défauts et, par là, de bonnes propriétés électroniques.

Le silicium amorphe souffre de plus d'un effet de vieillissement lié à l'instabilité de l'hydrogène dans sa structure due aux effets de surface et aux réactions chimiques avec le milieu extérieur (H₂O, CO₂,...).

Pour le (CdTe), la présence du cadmium qui est un métal lourd de toxicité comparable à celle du mercure rend le (CdTe) relativement inapproprié à une application grand public.

Récemment, des avancées remarquables ont été obtenues sur un autre type de matériaux, les chalcopyrites, avec comme référence le diséléniure de cuivre et d'indium (CuInSe₂) ou (CIS). Cette filière est devenue donc rapidement la filière couche mince de référence.

Le champ de recherche sur ces matériaux couches minces reste relativement ouvert. Toute la gamme des matériaux possibles n'a pas été étudiée en détail. De nombreux efforts sont encore nécessaires pour obtenir une mise en œuvre assurant à la fois le coût minimum et le rendement maximum. [14]

I-5.7. Cellule solaire de type Schottky :

Le dépôt d'un métal convenablement choisi en couche mince sur le silicium conduit à des cellules de type Schottky. Le digramme énergétique de ce type de cellules sous illumination est montré sur la figure suivante :

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

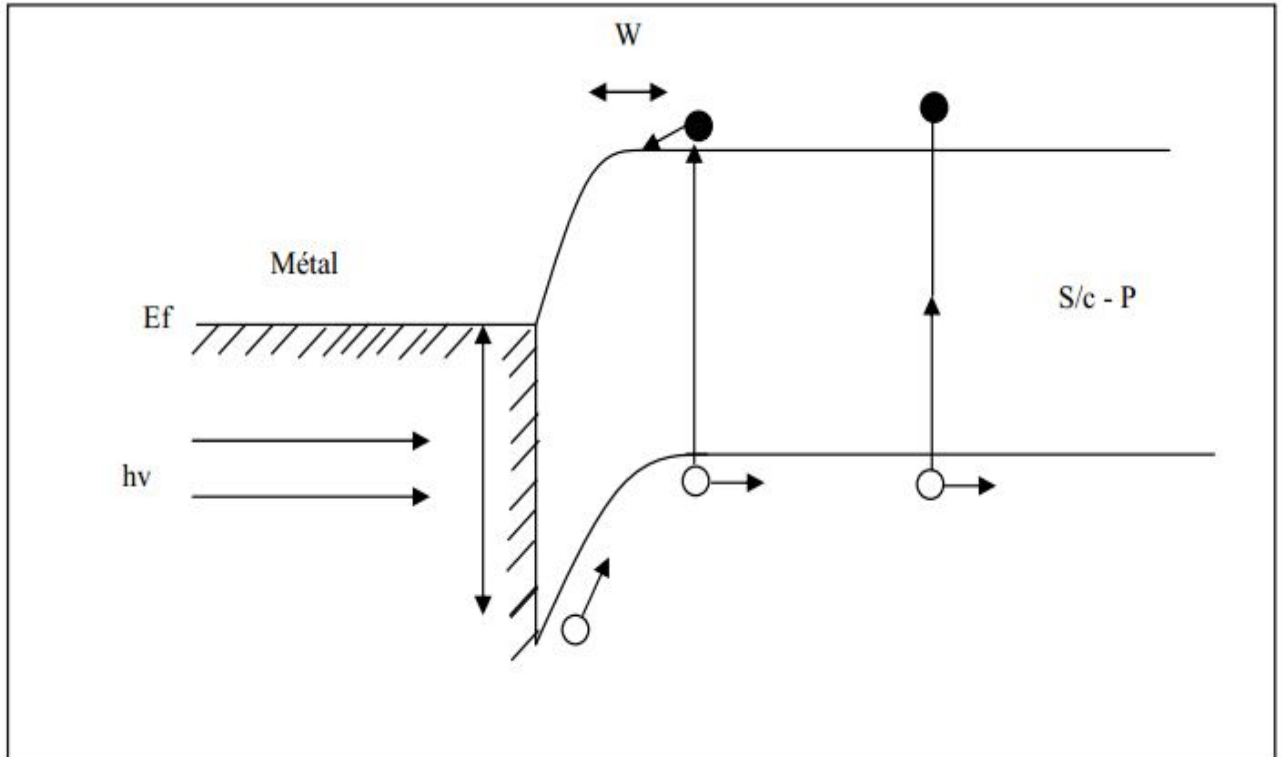


Figure I-8 Cellule solaire de type Schottky.

La couche métallique doit être très mince pour permettre à la lumière de semi-conducteur. Le photo-courant résultant a trois composantes. En effet, la lumière d'énergie « $h\nu > \phi_B$ » peut être absorbée dans le métal et excite des trous au-dessus de la barrière dans le semi-conducteur. Les rayonnements de courtes longueurs d'onde sont absorbés dans la région de déplétion dans le semi-conducteur et ceux de longues longueurs d'onde sont absorbés dans la région neutre, créant des paires électron-trou comme dans la jonction « P-N ».

Les avantages de la jonction Schottky sont :

- 1- Traitement à basses températures (aucune diffusion à haute température n'est exigée).
- 2- Adaptation au silicium poly cristallin et aux piles solaires en couches minces.
- 3- résistance élevée aux radiations due au champ électrique élevé près de la surface.
- 4- Fort courant de charge et bonne réponse spectrale.[14]

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

I-5.8.Cellule solaire de type structure MIS :

Dans ce type de cellule, un film isolant très mince 0,2 [nm] est formé entre le métal et le substrat semi-conducteur. L'isolant est obtenu soit par oxydation superficielle du silicium (thermiquement ou chimiquement par le (NO_3H)), soit par dépôt de (SiO_2) en atmosphère contrôlée. Puisque l'oxyde peut être formé à basses températures et aucun procédé de diffusion n'est impliqué, on s'attend à ce que cette structure fabriquée sur des substrats polycristallins ou amorphes fournisse une solution rentable pour des applications terrestres. Un rendement de 18% est obtenu par cette structure dans la condition AM1.

I.6.La partie utilisation :

La partie utilisation se compose de plusieurs récepteurs (utilisateurs), (exemple: éclairage, pompage, ...)

I.6.1.Contrôle d'énergie :

La partie contrôle d'énergie est composée d'un système de stockage avec ou sans régulation, plus les câbles de connexion.

- Le stockage d'énergie: il permet de satisfaire les besoins malgré le caractère aléatoire de l'énergie solaire reçue.
- Adaptation d'impédance: elle permet de mieux utiliser le champ photovoltaïque ; en fixant la tension du système, celui-ci reste dans la zone de fonctionnement optimale.[15]

I.7.Rappel : Les semi-conducteurs :

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de leur pureté, des irrégularités de leur structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées.

A la température de 0 K (-273°C) chaque atome de la grille cristalline est attaché à quatre atomes voisins par la mise en commun de leurs électrons

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

périphériques (liaisons covalentes), assurant la cohésion du cristal. Dans la figure (I-10), les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium, aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique n'existe. La conductivité du silicium est alors très faible.

Cependant l'élévation de la température permet la libération dans la structure, de certains électrons périphériques, par apport d'énergie. De plus, la libération d'un électron provoque l'apparition d'un trou dans la structure cristalline, soit la création d'une paire électron-trou.

Par exemple, à la température de 300 K (27°C), il y a $1,45 \cdot 10^{10}$ paires électron-trou dans un centimètre cube de silicium. Ce phénomène est à l'origine de l'augmentation de la conductivité du semi-conducteur. [16]

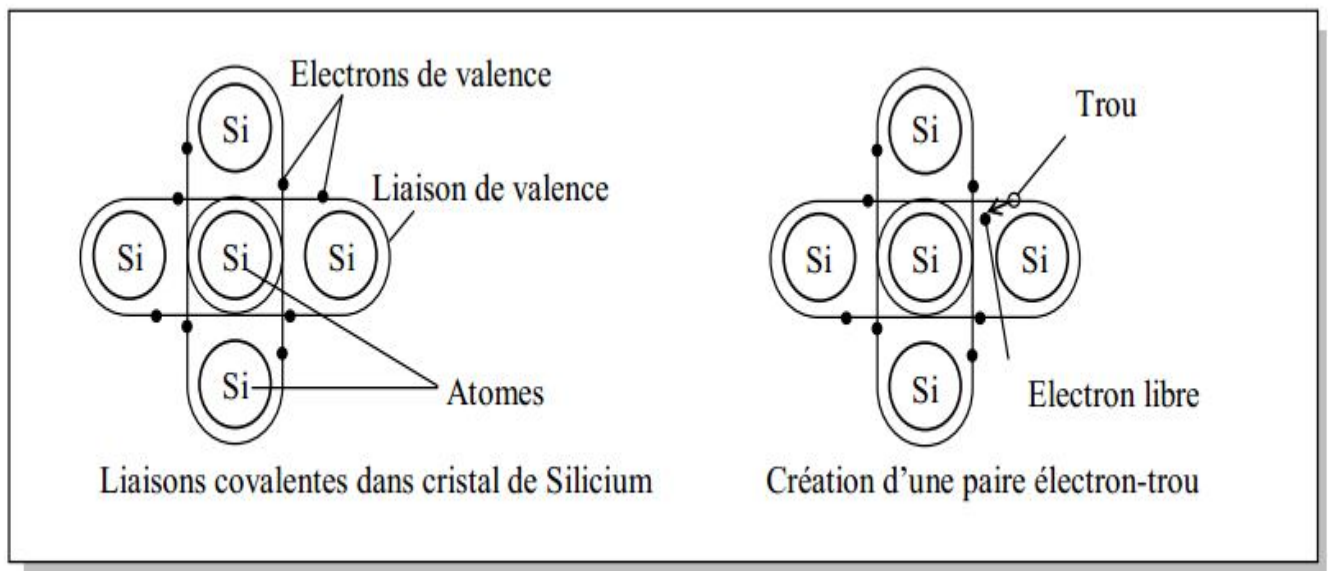


Fig. (I.10) : Semi-conducteur intrinsèque

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

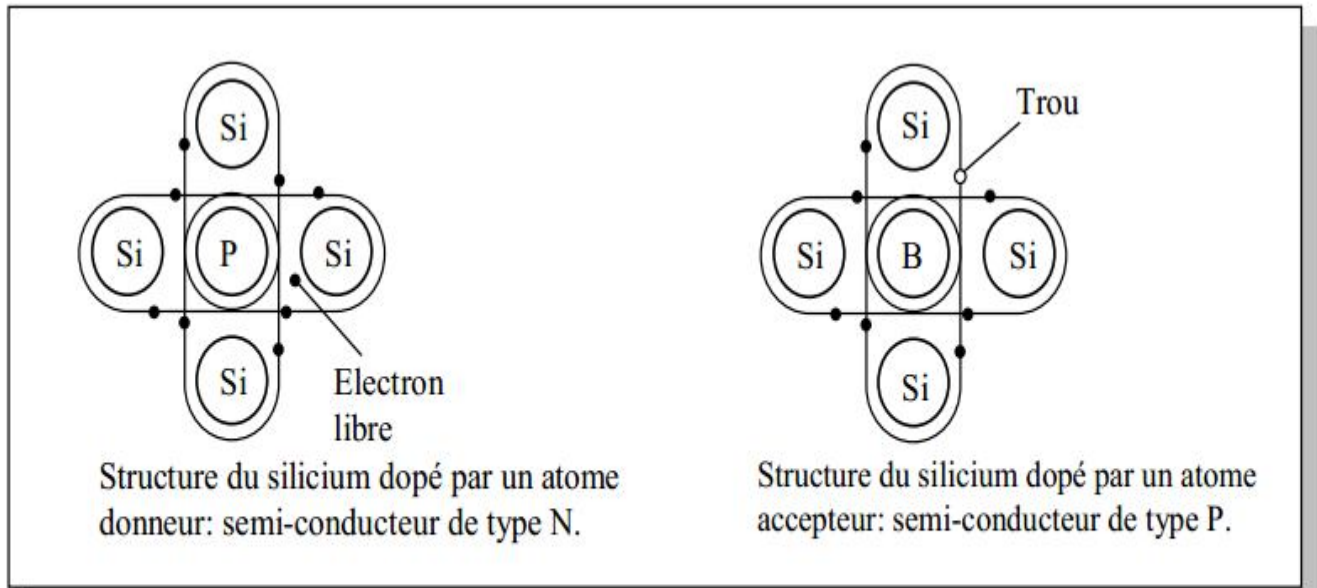


Fig. (I.11) : Semi-conducteur extrinsèque

I.7.1. La jonction N-P :

La jonction N-P est un dispositif semi-conducteur constitué d'un cristal dont une partie a été dopée N et l'autre dopée P, les deux parties étant séparées par un plan dit de jonction.

Examinons le fonctionnement d'un tel dispositif. Imaginons que l'on sépare la jonction en deux parties et qu'on relie la région N au pôle négatif d'un générateur et la région P au pôle positif (polarisation directe). Les électrons libres de la région N, ainsi que les trous libres de la région P, vont vers la jonction, vu le sens de polarisation. Si les deux parties sont en contact, un courant passe. Les électrons sont injectés dans la région P et les trous dans la région N. On dit qu'il y a injection de porteurs minoritaires. Si l'on polarise la jonction en sens inverse, les électrons allant vers le pôle (+) et les trous vers le pôle (-), ils s'éloignent de la jonction, laissant au voisinage de celle-ci des charges dues aux impuretés ionisées. Mais ces impuretés sont des atomes rigidement liés au réseau cristallin, qui ne peuvent se déplacer. Si l'on met les deux parties en contact, on a au voisinage une région isolante, et la résistance du dispositif en polarisation inverse sera donc très élevée. La jonction N-P joue donc le rôle d'un redresseur laissant passer le courant électrique en polarisation directe et présentant une très forte résistance en polarisation inverse. Si la polarisation est directe, il y a injection

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

de porteurs minoritaires, par exemple des électrons dans la région P ; ces électrons ont tendance à se recombiner avec les trous présents en grand nombre dans cette région P ; ils le font au bout d'un temps t appelé durée de vie des porteurs minoritaires.

Cette durée de vie est l'un des paramètres fondamentaux qui déterminent la qualité de la jonction. Plus t est grand, plus l'effet redresseur est marqué. Le silicium est à ce sujet le meilleur semi-conducteur connu (t peut atteindre la valeur de 1 milliseconde, alors qu'il est de l'ordre de la microseconde pour la plupart des autres semi-conducteurs). Un autre paramètre important est la longueur de diffusion : l'électron injecté dans la région P diffuse sur une certaine distance L avant de disparaître au bout du temps t ; c'est cette longueur moyenne parcourue par les électrons dans la région P qui est appelée longueur de diffusion. Elle est de l'ordre de plusieurs micromètres pour le silicium.

Si l'on soumet une jonction PN de faible épaisseur à un flux lumineux, des paires électron-trou sont créées par les photons dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite du matériau. Il en résulte une augmentation du courant inverse de saturation proportionnelle au flux lumineux. Physiquement, cet effet se traduit de deux manières selon le quadrant de fonctionnement du dispositif : dans le 3ème quadrant, le système fonctionne en récepteur dont la résistance varie fortement avec l'éclairement, c'est la photorésistance ; dans le 4ème quadrant, le système fonctionne en générateur dont le courant de court-circuit est proportionnel à l'éclairement et dont la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe (0.5 à 0.8 Volts pour Si) ; c'est la cellule photovoltaïque à jonction PN.

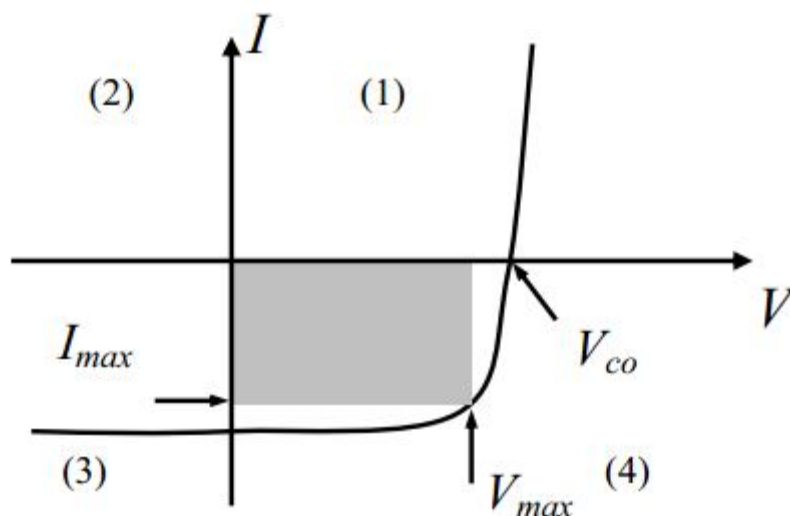


Fig. (I.12) : Caractéristique courant-tension

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

Nous allons maintenant nous intéresser uniquement au quadrant (4) pour la réalisation de générateurs photovoltaïques à partir de cellules photovoltaïques. Pour cela, nous allons représenter les caractéristiques dans un nouveau repère (I, V) (cf. figure I-13) où le courant de saturation inverse est compté positivement. I_{CC} représente le courant de court-circuit et V_{CO} la tension en circuit ouvert de la cellule photovoltaïque.

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque idéale comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN, figure I-14. [16]

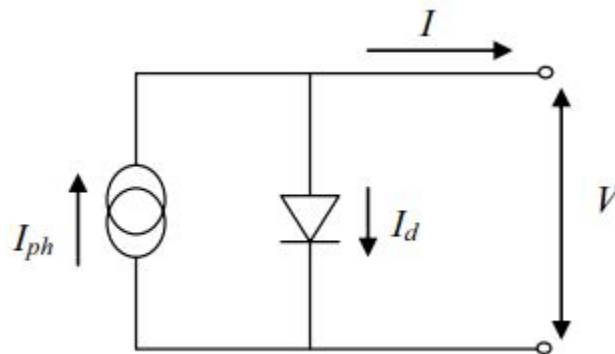


Fig. (I.14) : schéma équivalent d'une cellule PV

I.7.2. Facteurs limitation de rendement d'un générateur photovoltaïque

La quantité d'énergie produite par un système photovoltaïque dépend fortement, des caractéristiques électromécaniques de chacun des éléments du système, de la surface du champ capteur, de la quantité d'énergie solaire incidente sur la surface de la partie captation de ce système, de la température ambiante qui influe aussi sur la réponse de ce type de système. [16]

I.7.2.1. Influence de la résistance série R_s

La résistance série caractérise les pertes par effets Joule de la résistance propre du semi conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule. Les contacts semi conducteur-électrodes à résistance élevée abaissent appréciablement la tension et le courant de sortie ce qui va limiter le rendement de conversion. [17]

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

I.7.2.2. Influence de la résistance parallèle R_{sh}

La résistance parallèle (ou shunt) caractérise les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structuraux du matériau épaisseurs des régions N et P et de la zone de charge et d'espace.

L'existence de fissures et de défaut de structures complexes devient le siège de phénomène physique assimilable aussi à une résistance parallèle R_{sh} .

L'ordre de grandeur de la résistance parallèle pour une cellule au Si :

$R_{sh} = 10^2 \text{ à } 10^4 \Omega$. R_{sh} augmente avec le groupement série de cellules solaires et diminue avec une connexion parallèle.

I.7.3. Association des cellules photovoltaïques

I.7.3.1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

La figure I-15 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n_s cellules identiques.

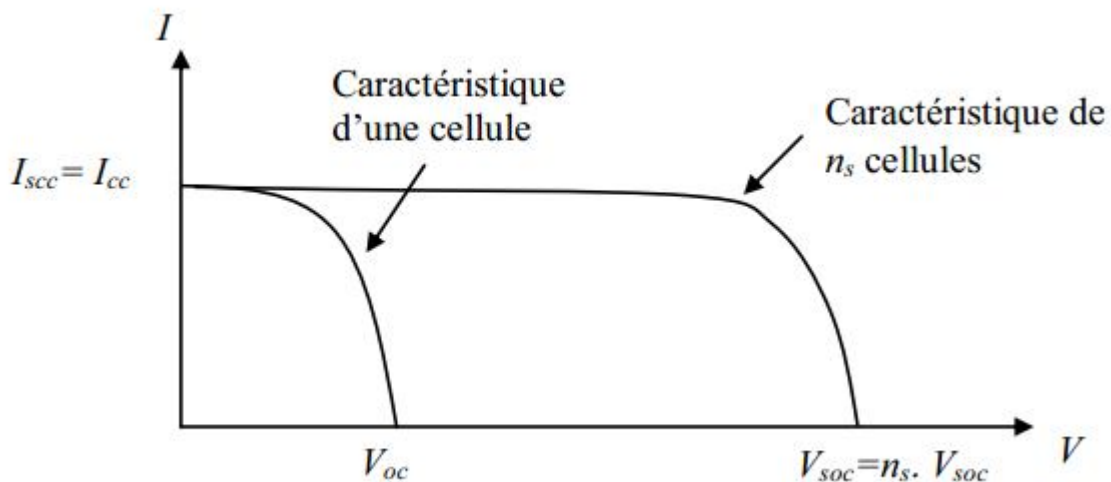


Fig. (I.15) : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellule identiques

I.7.3.2. Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.

CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

La figure I-16 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles n_p cellules identiques.

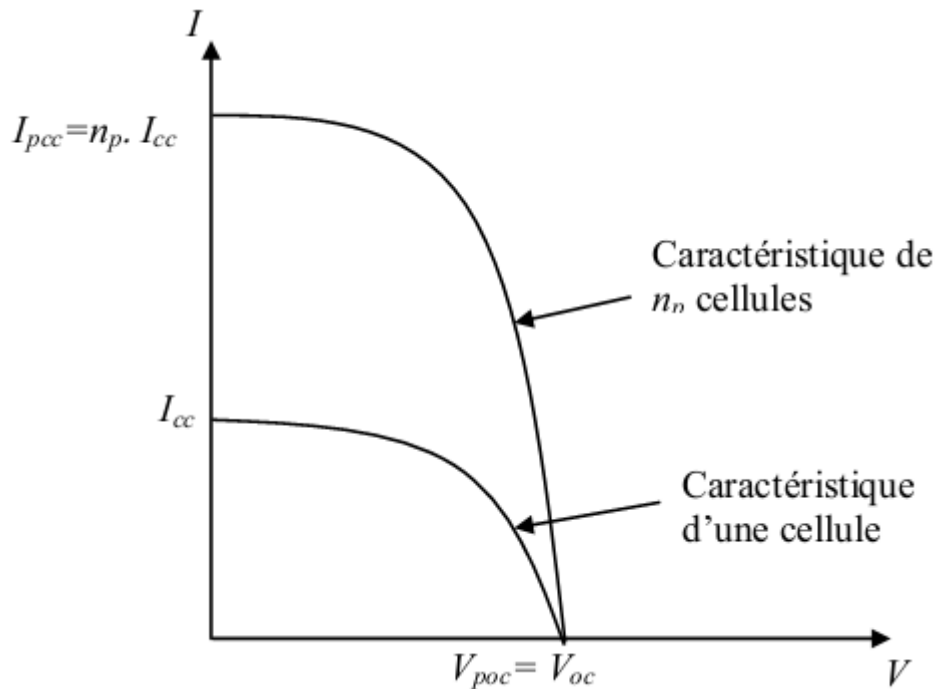
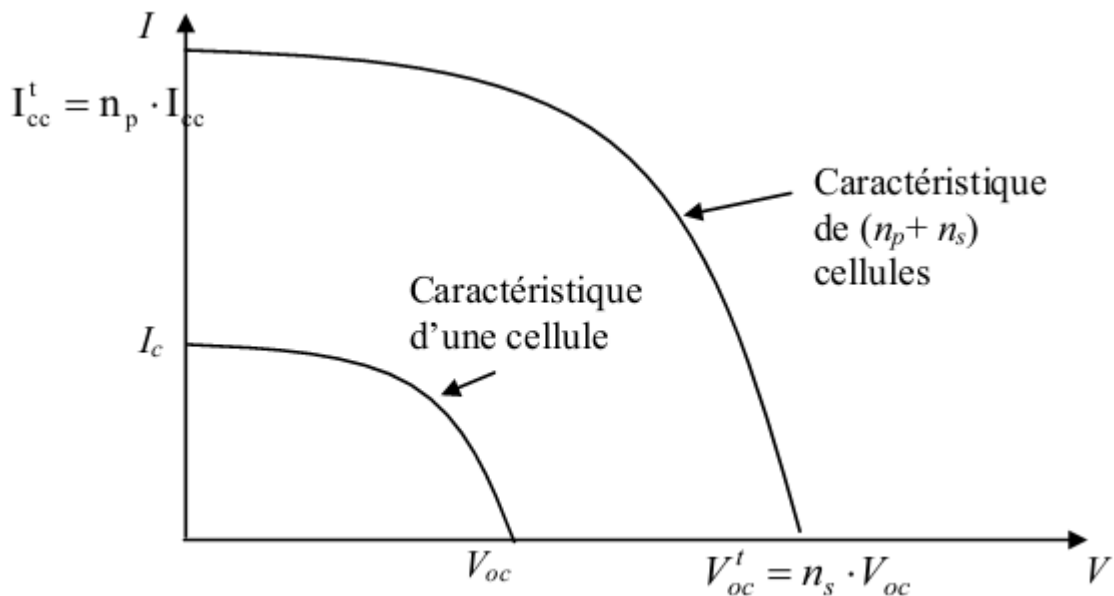


Fig. (I.16) : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques

I.7.3.3. Association hybride (en série et en parallèle) :

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale

La figure I-11 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série n_s et en parallèle n_p , cellules identiques.



CHAPI généralité sur la cellule photovoltaïque

Fig. (I.17) : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de $(n_p + n_s)$ cellules identiques

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{oc} sont plus ou moins importantes (figure I-17). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes).

I.8 Conclusin :

Dans ce chapitre nous avons donné les notions fondamentales des semi-conducteurs, dans lequel nous avons présenté la structure de bande des deux principaux semi-conducteurs. Puis nous avons donné les différents types de recombinaison en surface et en volume dans la cellule solaire. Dans le chapitre suivant nous présenterons les différents types du silicium de qualité électroniques ainsi les propriétés physiques du silicium et du germanium.

CHAP II matériaux et outil pour l'analyse des cellules PV

II.1 Introduction :

La technologie Silicium-Germanium (SiGe), dont les développements préliminaires datent du milieu des années 1980 et dont l'arrivée sur le marché est récente, répond à ce besoin conjoint de l'économie et des performances. Des transistors bipolaires à hétérojonction ou des transistors à effet de champ, aux dispositifs quantiques, un nombre important de fonctions sont alors permises. Seules certaines réussissent le pari de l'intégration à moindre coût, mais les fonctions fondamentales tendent déjà à bouleverser les habitudes du concepteur de circuits micro-ondes qui voit une technologie nouvelle se présenter à lui, face aux technologies pour un moindre coût.

De plus, de nombreuses études restent également à mener pour évaluer l'ensemble des possibilités offertes par l'alliage SiGe. L'une de ces possibilités a encore été peu étudiée : il s'agit de l'utilisation du transistor bipolaire SiGe comme phototransistor [18] [19]. L'industrie électronique mondiale a acquis de nos jours un formidable savoir-faire dans le traitement du Silicium. Les avantages naturels: mécaniques, thermiques et chimiques, du Silicium ont tenu une grande part dans la réussite de sa maîtrise technologique, dans la diminution des coûts de fabrication, et ainsi dans sa généralisation.

Cependant, le Silicium ne profite pas du même enthousiasme quant à ses propriétés électriques, au point de pouvoir être considéré comme un semi-conducteur lent.

L'avantage, bien que le coût soit plus élevé, revient alors nettement aux différents composés III-V lorsqu'il s'agit de monter à des fréquences supérieures à quelques GHz.

L'adjonction de Germanium présente en partie une alternative à ce problème en permettant de retravailler les bandes d'énergies du Silicium en vue d'en améliorer les performances. C'est en ce sens que cette idée de réaliser des transistors bipolaires SiGe, qui remonte aux années 1960, est exploitée depuis le milieu des années 1980 [20].

Les propriétés optiques du SiGe ont été étudiées depuis les débuts de ce matériau, laissant entrevoir un potentiel important en détection proche infrarouge ($0,8\mu\text{m}$ à $1,55\mu\text{m}$), en supports guides d'ondes, mais également en émission au travers de modulateurs [21], [22]. Les dispositifs exploitant ces propriétés sont en phase active de recherche plus particulièrement depuis le début des années 1990, bien que leur intérêt ait été décelé depuis la réalisation des premières hétérostructures SiGe.

II.2. Propriété physique du silicium et du germanium :

II.2.1. Hauteur de la bande interdite :

La taille E_g de la bande interdite donne des caractéristiques électriques importantes à chaque semi-conducteur (Tableau II.1). Ces variations peuvent être décrites approximativement par la fonction universelle

Semi-conducteur	$E_g(0)$ (eV)	a (eV/K)	b (K)
Si	1.170	$4.73 \cdot 10^{-4}$	636
Ge	0.7437	$5.405 \cdot 10^{-4}$	235

Tableau II.1 Paramètres de la variation de la bande interdite en fonction de la température

$E_g(0)$ est la hauteur de la BI à 0°K, T température en ° K, a et b sont des constantes [23]

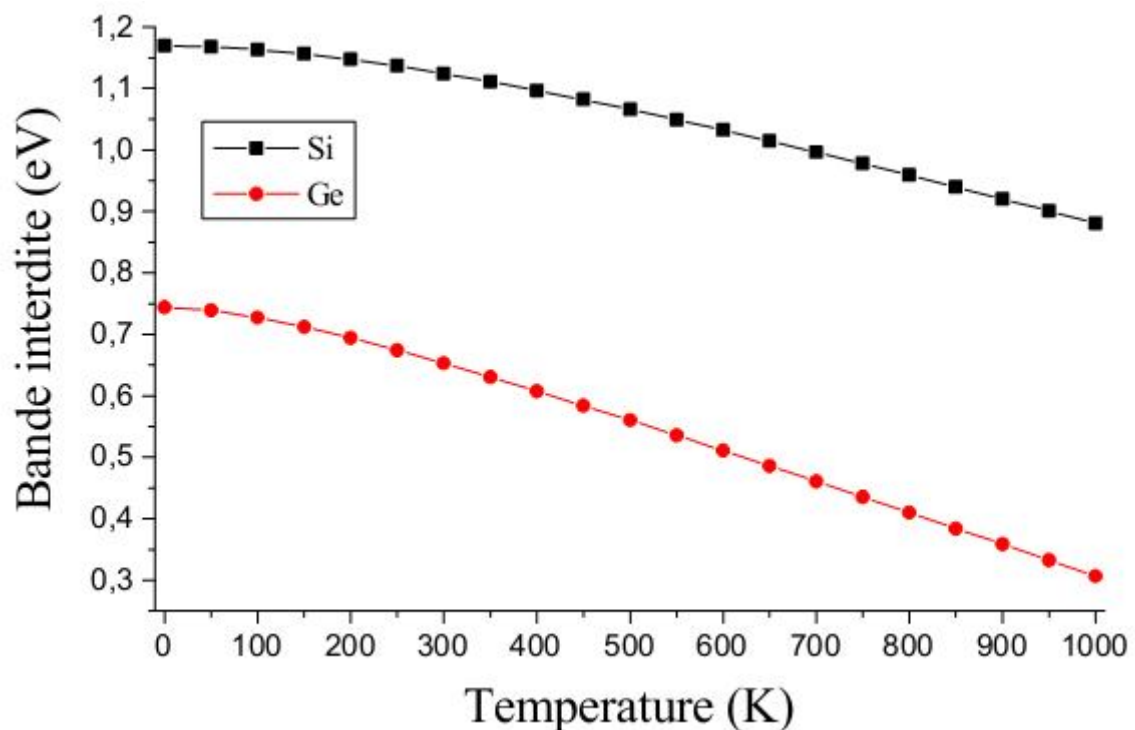


Figure II.1. Variation de la bande interdite du Si et Ge en fonction de la température

L'évolution de la variation de la largeur de la bande interdite du silicium et du germanium en fonction de la température est illustrée à la figure II.1. On peut remarquer que E_g dépend fortement de la température. En effet pour des températures plus élevées, on observe une décroissance sensible de la largeur de la bande interdite.

Propriété à 300°K		Si	Ge
Largeur de bande interdite $E_g(\text{ev})$		1,12	0,67
Concentration d'atomes ($/\text{cm}^3$)		$5 \cdot 10^{22}$	$4,42 \cdot 10^{22}$
Concentration intrinsèque ($/\text{cm}^3$)		$1,45 \cdot 10^{10}$	$2,4 \cdot 10^{13}$
Mobilités intrinsèques ($\text{cm}^2/\text{V.s}$)	μ_n	1350	3900
	μ_p	480	1900
Constantes diélectriques relatives ϵ_r		11,7	16,3
Champ de claquage V/m		$-30 \cdot 10^6$	$-8 \cdot 10^6$

Tableau II.2. Propriétés électriques des principaux semi- conducteurs [23]

II.2.2. La conductivité :

Une bonne conductivité thermique est nécessaire dans le substrat semiconducteur, d'une part pour réduire la température du substrat par dissipation, et d'autre part pour assurer une température uniforme dans tout le substrat, afin d'améliorer la similitude du comportement des dispositifs de nature identique mais placés dans différentes positions dans le substrat semiconducteur.

L'électronique d'état solide a pris le relais avec succès, grâce à sa plus haute densité d'intégration et à sa plus faible consommation d'énergie, ce qui ne rendait plus nécessaire aucune considération d'ordre thermique. Mais les technologies des circuits intégrés sur le silicium ont fortement évolué en densité d'intégration, et densité de puissance dissipée, tout en conservant le même type de substrat semiconducteur.

De même, des nouveaux matériaux semi-conducteurs de plus large bande interdite et de plus importante conductivité thermique, tels que le SiC et le Diamant, sont étudiés pour des applications à plus de 300°C. En ce qui concerne la gestion de la chaleur dans les circuits intégrés analogiques et mixtes, quelques techniques d'implémentation peuvent être appliquées afin de minimiser les gradients et les transitoires thermiques autour des structures les plus sensibles [24] [25].

Les semi-conducteurs y occupent un grand intervalle car leur conductivité dépend sensiblement de la température, mais elle varie surtout très fortement en fonction de la présence de petites quantités d'impuretés bien choisies. Dans un monocristal de silicium intrinsèque, à la température ambiante quelques électrons ($1,5 \cdot 10^{10}$ électrons pour $5 \cdot 10^{22}$ atomes dans un cm^3) sont excités thermiquement depuis la bande de valence vers la bande de conduction, et les électrons libres et les trous positifs ainsi créés contribuent ensemble à la conductivité du matériau, mais celle-ci reste assez faible.

Le courant dans un semiconducteur étant en général la somme de celui dû au déplacement des électrons libres, et de celui dû au déplacement des trous, la conductivité σ est reliée à la densité des porteurs n et p, et à leur mobilité μ par la relation :

$$\sigma (T)=q(n\mu_n(T)+p\mu_p(T))\dots\dots\text{Eq(II.1)}$$

Où :

q est la charge de l'électron.

n et p sont les densités des électrons et des trous, et μ est le coefficient qui, à une température donnée, relie la vitesse de dérive moyenne du porteur au champ électrique appliqué.

II.2.3. Les masses effectives :

Les surfaces de l'énergie sont des ellipsoïdes. Et on donne :

Pour le silicium [26] [27]:

$$m_t = 0.98m_0$$

$$m^- = 0.32m_0$$

Pour le germanium [28] :

$$m_l = 1.59m_0$$

$$m_t = 0.0815m_0$$

$$m^- = 0.22m_0$$

Avec :

$$m^- = (9m_l m_t^2)^{1/3}$$

Où :

m_l : est la masse effective longitudinale.

m_t : est la masse effective transversale.

m^- : est la masse effective de la densité d'état (masse réduite).

m_0 : est la masse de l'électron. Avec $m_0 = 9.1 \cdot 10^{-31}$ kg

II.2.4. Tableau des propriétés physiques du Si et Ge

Propriétés	Silicium	Germanium
Structure	Diamant	Diamant
Densité (g/cm ³)	2,328	5,3267
Constante diélectrique	11,9	16,0
N _c (cm ⁻³)	2,8.10 ¹⁹	1,04.10 ¹⁹
N _v (cm ⁻³)	1,04.10 ¹⁹	6,0.10 ¹⁸
Affinité d'électron	4,05	4,0
Energie de Gap à 300°K (eV)	1,12	0,66
Concentration intrinsèque des porteurs (cm ⁻³)	1,45.10 ¹⁰	2,4.10 ¹³
Duré de vie minoritaire (s)	2,5.10 ⁻³	10 ⁻³
Mobilité des électrons (cm ² .V ⁻¹ .s ⁻¹)	1500	3900
Mobilité des trous (cm ² .V ⁻¹ .s ⁻¹)	450	1900
Indice de réfraction	3,44	3,97

Tableau II.3. Propriétés physiques du Si et Ge [25] [29]

II.3. Propriété générale de l'alliage Si1-xGex :

En 1948, Bardeen, Brattain et Shockley inventèrent le transistor bipolaire. Bien que le matériau exploité fût le Germanium, le Silicium a prît le relais à peine quelques années plus tard dans les développements de l'électronique. La période de transition, qui en découla autour de 1960, favorisa les premières études sur le mélange de ces deux composés en alliage Si1-xGex.

Il est alors amusant de s'apercevoir que les premières études concernant ce matériau n'ont pas toujours été réalisées dans l'esprit de trouver un meilleur matériau, mais plutôt parfois dans la volonté de profiter de qualités de réalisabilité de l'alliage, de miscibilité des deux constituants l'un dans l'autre, ou de disponibilité des deux matériaux, pour atteindre un but différent qui était d'étudier des phénomènes généraux afin d'en tirer des lois et des modèles applicables à la classe entière des matériaux semi-conducteurs, comme les phénomènes d'absorption optique [30].

Dans ce cadre également, seul le substrat SiGe fut étudié. Le désaccord de maille qui existe entre le cristal de Silicium et le cristal de Germanium, ne permet pas, en effet, la croissance directe du SiGe sur substrat Si ou inversement, sans provoquer rapidement des dislocations du cristal irrémédiables pour le fonctionnement électrique de la jonction ainsi formée. Ce n'est donc qu'avec la possibilité de déposer et de contrôler avec précision des films d'une dizaine de nanomètres, que les premières études sur l'alliage SiGe contraint au paramètre de maille du Silicium et dépourvu de défauts, ont pu être entamées.

II.3.1. Le SiGe massif :

II.3.1.1. Structure cristalline :

Les structures cristallines du Si, du Ge ou de l'alliage de SiGe sont les mêmes : elles consistent en deux cubes à faces centrées, décalés chacun selon la diagonale principale d'un quart de la longueur de celle-ci. Dans cette structure, pour le SiGe, les atomes de Silicium et de Germanium sont répartis de manière aléatoire et homogène. Cette répartition aléatoire définit l'absence de plans préférentiels au sein du cristal qui pourraient, pour l'un, contenir majoritairement des atomes de Si, pour l'autre, majoritairement des atomes de Ge [31]. Ceci définit l'absence de phases chimiques qui produiraient une certaine périodicité dans la répartition du Germanium.

Voilà la structure cristalline du SiGe. En d'autres mots, il s'agit de celle du Silicium dans laquelle certains atomes ont été échangés aléatoirement avec des atomes de Germanium. Cela peut également être dit à l'envers : la structure cristalline du SiGe est celle du Germanium dans laquelle certains atomes ont été échangés aléatoirement avec des atomes de Silicium. Une représentation symbolique est fournie par la Figure II.2 ci-après.

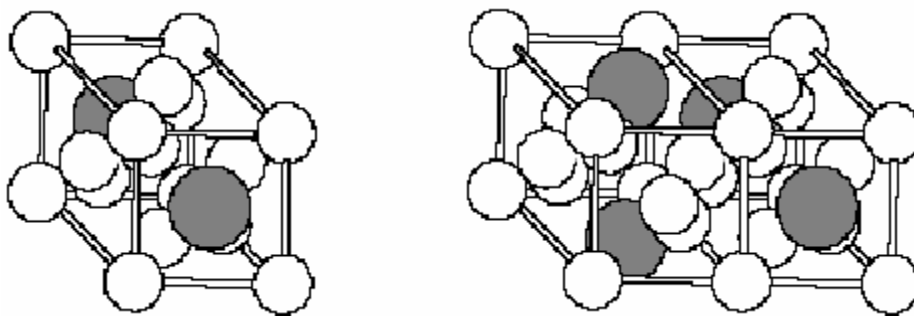


Figure II.2. Exemples de maille dans un cristal de SiGe.

Les atomes sont représentés par des sphères de petite taille (14 électrons) pour le Silicium et de plus grande taille (32 électrons) pour les atomes de Germanium. Les traits matérialisent les limites des structures cubiques à faces centrées.

Bien que la représentation des atomes par des sphères de diamètre donné soit sommaire, elle permet de comprendre aisément la notion de paramètre de maille dans un cristal. En ce sens, si les atomes sont gros, le paramètre de maille devra s'élargir afin de préserver l'équilibre. A l'inverse, si les atomes sont petits, le paramètre de maille sera

plus faible. Le matériau est dit relaxer lorsque aucune contrainte de pression ne s'exerce sur l'une ou l'autre des liaisons et que le paramètre de maille est laissé libre.

Les données pour le cristal de Silicium et le cristal de Germanium sont présentées dans le Tableau II.3. Le diamètre de l'atome de Germanium étant plus grand que celui de l'atome de Silicium, le cristal de Germanium massif présentera un paramètre de maille plus grand que celui du cristal de Silicium.

Dans le cas du matériau $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, ces atomes de diamètres différents sont mélangés.

Le paramètre de maille du cristal va donc évoluer d'un extrême à l'autre, passant de la valeur du cristal de Silicium, pour la fraction molaire $x=0$, à celle du cristal de Germanium, pour $x=1$

Il s'agit là du premier paramètre du SiGe variant avec la concentration de Germanium. La loi de Vegard appliquée à ce cas prédit une variation linéaire du paramètre.

Ceci est une extrapolation extrêmement courante et utile. La mesure ne montre qu'une infime déviation autour de cette loi, Figure II.3, [32].

	Silicium	Germanium
Diamètre de l'atome (°A)	1,46	1,52
Paramètre de maille (°A)	5,43	5,66

Tableau II.4. Paramètres des atomes des cristaux de Silicium et de Germanium massifs

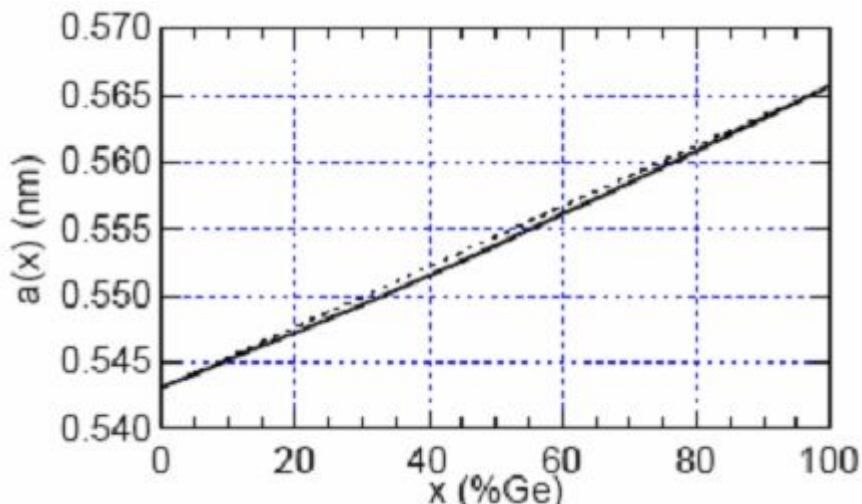


Figure II.3. Variation du paramètre de maille du cristal $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ en fonction de la composition de Germanium.

La courbe en pointillés représente l'approximation par la loi de Vegard. La répartition des atomes de Germanium dans le cristal peut cependant être ordonnée dans le volume. Ce phénomène est principalement engendré par des considérations de dynamique de croissance de film plutôt que par des raisons de stabilité. Il dépend donc du mode de production du cristal. On trouve dans ces conditions les cas suivants :

- Pas d'ordonnement dans le SiGe massif produit à partir de SiGe liquéfié, ni dans celui produit par dépôt sur un substrat d'orientation $\langle 111 \rangle$;
- Ordonnement présent dans le volume et aux interfaces du SiGe massif produit par dépôt sur substrat d'orientation $\langle 100 \rangle$ entre 300°C et 800°C (des techniques particulières utilisant des tensio-actifs permettent néanmoins de l'éviter).

Cette existence de différentes phases, avec des plans de Silicium et des plans de SiGe au sein du cristal, peut affecter les performances optiques du matériau dans les dispositifs où les interfaces sont nombreuses, comme au sein des super-réseaux, [31] [33] [34].

II.3.1.2. Bandes d'énergies :

L'alliage SiGe massif, ou relaxé, présente de manière générale un intermédiaire entre le cristal de Silicium et le cristal de Germanium. Ainsi, l'augmentation progressive de la fraction de Germanium dessine une modification continue des propriétés du cristal de Silicium vers celles du Germanium.

Les bandes d'énergies des deux extrêmes sont représentées en espace réciproque sur la Figure II.4 à 300K. Le Germanium et le Silicium sont tous les deux des matériaux à gap indirect. Le sommet de la bande de valence est situé en $k=0$ (région Γ) alors que le bas de la bande de conduction du Germanium se situe en vallée L, tandis que celui du Silicium se situe en vallée X. Ces bandes d'énergies définissent des valeurs de bande interdite, indirectes ou directes, qui sont donc différentes. Leurs valeurs à température ambiante sont données par le Tableau II.5

	Silicium	Germanium
Largeur de la bande interdite directe (eV)	>2,50	0,90
Largeur de la bande interdite indirecte (eV)	1,10	0,65

Tableau II.5. Largeurs de bande interdite, directe et indirecte, pour le cristal de Silicium et le cristal de Germanium à 300K.

Les valeurs de ce tableau sont données volontairement à $\pm 0,05\text{eV}$. Cet écart est couramment rencontré dans la littérature et est suffisant pour une présentation générale. Il traduit, outre les imprécisions, les variations impliquées par les différences de méthodes de mesure.

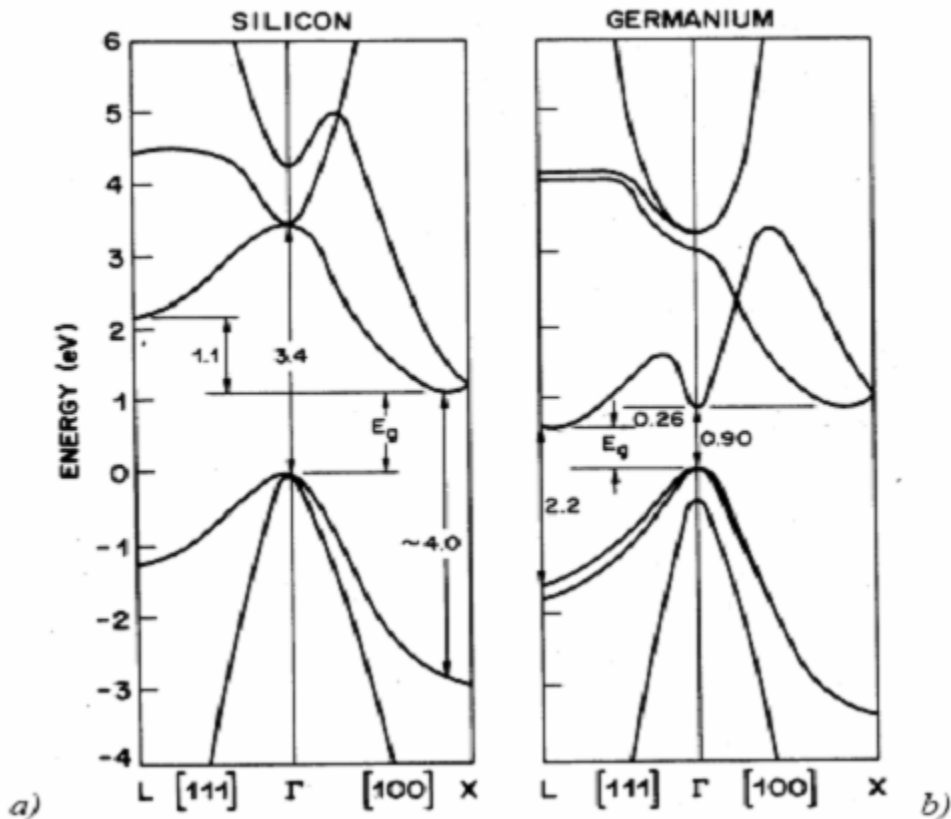


Figure II.4. Schéma des bandes d'énergies dans l'espace réciproque à 300K, pour a) le Silicium ; b) le Germanium

Les mesures réalisées sur la valeur de la bande interdite indirecte, E_g , ont exploité les spectres d'absorption optique du SiGe massif. La comparaison à des modèles l'absorption indirecte a permis l'extraction précise de cette largeur de bande. Les mesures réalisées en 1958 par Braunstein [30], sont présentées sur la figure suivante :

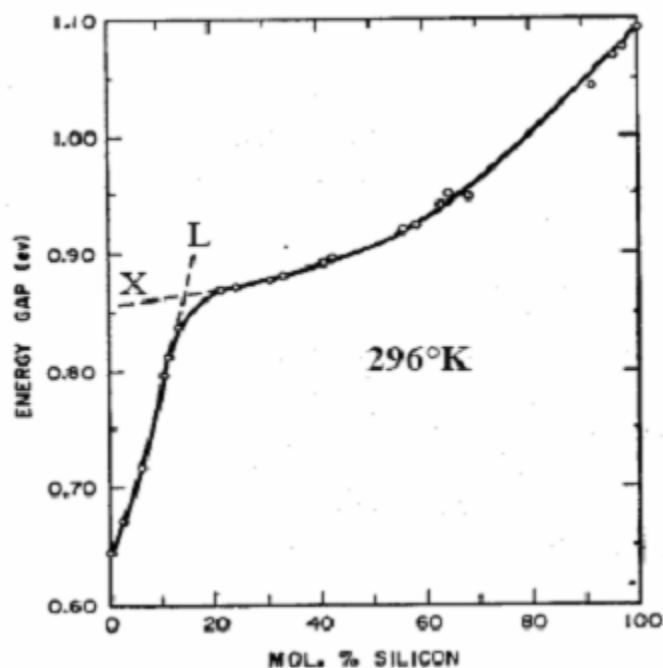


Figure II.5. Largeur de bande interdite indirecte en fonction de la composition du Si dans l'alliage SiGe à 296°K [30]

La position de gauche sur l'axe horizontal repère le cas du Germanium pur tandis que celle de droite repère celui du Silicium.

Les variations en fonction de la composition de Germanium de la largeur de bande interdite suivent une évolution de la position des minima de la bande de conduction du Silicium vers celle des minima du Germanium. Deux seules vallées rentrent en jeu.

Le minimum de la bande de conduction du Si_{1-x}Ge_x se trouve d'abord dans la vallée X qui est celle du minimum du Silicium pur, puis dans la vallée L qui est celle du Germanium pur, au-delà de 85% de Ge.

Avant que ce dernier ne se positionne dans la vallée L, il a fallu que l'énergie de la bande de conduction du Silicium s'affaisse légèrement dans cette vallée et qu'elle augmente légèrement dans la vallée X. Ceci se produit depuis le silicium pur jusqu'à x=0,85. Au-delà, le minimum de la vallée L prévaut alors sur la largeur de bande interdite indirecte [35].

Braunstein et al.[30] ont mesuré les spectres d'absorption optique de l'alliage SiGe dès 1958 en fonction de la température et de la composition. La dépendance de l'énergie de bande interdite avec la concentration en Ge est directement liée à la structure de bande de conduction.

Ainsi, on observe une transition assez brutale du gap lorsque l'on passe du matériau de type Si au matériau de type Ge. Krishnamurly et al [36] ont déduit une expression du gap optique à 300K pour chaque régime de variation s'accordant bien avec l'étude expérimentale de Braunstein et al.[23]. Les expressions du SiGe sont :

$$\begin{cases} E_g^X = 1.1053 - 0.3803x + 0.1691x^2 \\ E_g^L = 2.1762 - 1.7442x + 0.3306x^2 \end{cases} \dots\dots\dots\text{Eq(II.2)}$$

II.3.1.3. Propriétés optiques :

Les matériaux Silicium, Germanium et SiGe, sont tous les trois des matériaux à gap indirect. Les transitions des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction provoquées par l'incidence de photons sont verticales. En l'absence de tout autre mécanisme, elles ne peuvent donc se produire que pour des transitions de hauteur au moins égale à la valeur de la bande interdite directe. Sa valeur, indiquée précédemment, Tableau II.5, est supérieure à 2,5eV. Celle du Germanium est plus basse avec 0,90eV.

La limite correspondante d'absorption en longueur d'onde vaut alors l'inverse de cette limite en énergie, multiplié par un facteur 1,24 eV.µm, d'après les liens qui existent entre l'énergie et longueur d'onde. La limite d'absorption directe du Silicium est donc inférieure à 0,5µm, dans le visible vers le bleu. Celle du Germanium est en revanche de 1,38µm.

Cependant, il existe également une absorption indirecte qui se produit entre deux extrema des bandes de conduction et de valence, et qui prolonge l'absorption en longueur d'onde. Ceux-ci sont décalés dans l'espace des vecteurs d'onde, aussi, pour

expliquer ce phénomène, il est nécessaire de faire intervenir un mécanisme permettant la conservation de la quantité de mouvement.

Cette conservation, que ne saurait faire respecter un photon lors d'une transition indirecte, fait essentiellement appel aux propriétés vibratoires du réseau, concentrées dans une particule appelée phonon : ainsi, durant l'absorption indirecte d'un photon, un phonon, dont la quantité de mouvement est égale à celle qui sépare l'extrémum de la bande de valence avec le minimum de la bande de conduction, sera généré ou absorbé. Ce mécanisme est schématisé par la Figure II.6.

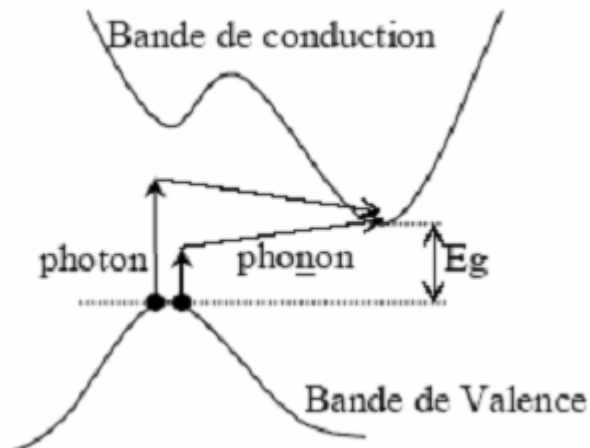


Figure II.6. Schéma du mécanisme d'absorption indirecte assisté par phonon.

La limite d'absorption indirecte est donc déterminée par la somme de la largeur de la bande interdite indirecte et de l'énergie des phonons mis en jeu. L'étude détaillée menée par Braunstein [19], a permis d'isoler les termes de largeur de bande interdite et d'énergie de phonon. Ce sont ces travaux qui ont permis de mesurer avec exactitude la valeur de la largeur de bande interdite du SiGe massif présenté au paragraphe précédent.

Les spectres d'absorption mesurés, d'une part pour des alliages riches en Silicium, d'autre part pour des alliages riches en Germanium, . L'absorption au sein de l'alliage SiGe est très similaire à celle du Silicium, jusqu'à des proportions de 30% de Germanium. Ceci est fondamentalement lié au fait que la largeur de bande interdite n'évolue que faiblement pour cette composition. En première approximation, le matériau se comporte comme le Silicium. Au-delà, dans le cas des alliages SiGe riches en Germanium, le spectre d'absorption évolue rapidement avec la composition pour se rapprocher du spectre du Germanium pur.

En définitive l'alliage SiGe massif ne présente d'améliorations vis-à-vis du Silicium quant à l'absorption optique, que si la proportion de Germanium est significative, c'est-à-dire supérieure à 30%. Il sera vu qu'il peut en être différemment pour le SiGe-contraint.

II.3.2. Le SiGe contraint sur Silicium :

II.3.2.1. Structure, contrainte et stabilité :

Le matériau $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ présente l'intérêt fondamental, pour les composants étudiés, de posséder une largeur de bande interdite plus faible que celle du Silicium. La mise en application de cette propriété nécessite néanmoins la réalisation d'au moins deux couches superposées Silicium- Germanium / Silicium alternant deux largeurs de bande interdite différentes. Cet empilement constitue une hétérostructure pour laquelle il existe a priori un désaccord de maille entre les deux matériaux. Ceci est schématisé par la Figure II.6.

Le désaccord de maille, pour 20% de Germanium, entre le SiGe et le Silicium reste cependant de l'ordre de 1%. Cette particularité rend possible la croissance de fines couches SiGe en accord de maille avec le Silicium. Le matériau possède alors des propriétés différentes de celles du SiGe massif, dit relaxer. Ceci justifie que l'on distingue le SiGe-contraint et le SiGe-massif. Puisque le paramètre cristallin des alliages SiGe est supérieur à celui du Silicium, les films contraints sur Silicium sont en compression biaxiale dans le plan de croissance, et en élongation normalement à l'interface. Les propriétés de transport sont, de ce fait, anisotropes [37] [38].

Dans le cas de films SiGe plus épais, les couches éloignées auront tendance à être relaxées. Il y a dès lors apparition de dislocations qui se propagent depuis l'hétérojonction jusque dans le volume de SiGe.

Les dislocations de matériaux constituent une dégradation profonde des qualités du matériau. Elles caractérisent donc un état critique qu'il n'est pas envisageable de tolérer dans un dispositif actif. Elles sont notamment la cause de mécanismes de recombinaison importants, ainsi que de fuites et court-circuits.

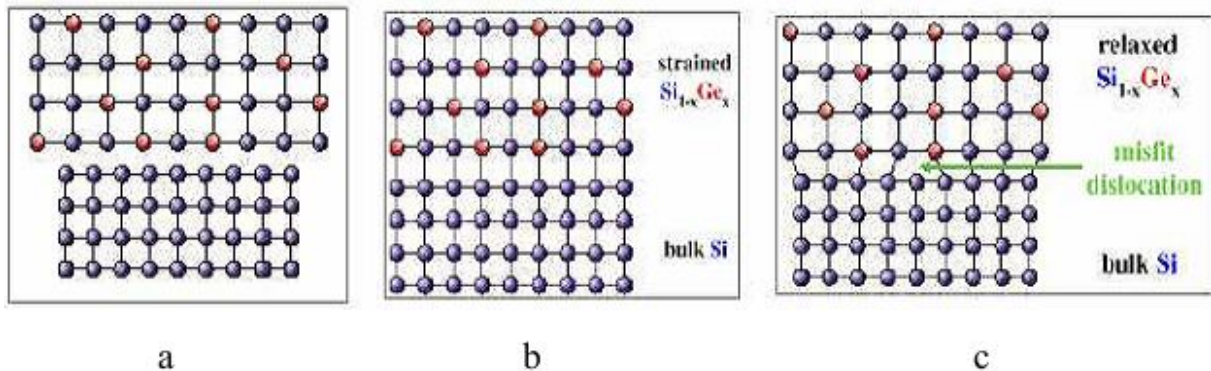


Figure II.6. Représentation plane de la structure cristalline d'hétérostructures SiGe/Si.

Trois cas possibles : a) pas de jonction, les deux matériaux sont relaxés et les paramètres de maille sont distincts ; b) la jonction des deux matériaux est réalisée, le film de SiGe est suffisamment fin pour que le film de SiGe-contraint soit stable ; c) la jonction est réalisée mais le film de SiGe est instable, des dislocations prennent naissance à l'interface et le matériau se relaxe

II.3.2.2. Réduction de la bande interdite :

Les atomes de Germanium, qui sont une ligne en dessous du Silicium dans la classification périodique des éléments, possèdent un cortège électronique doté d'une couche supplémentaire vis-à-vis du Silicium. Son occupation spatiale est nécessairement plus volumineuse et la représentation des atomes en sphères permet ainsi de mieux comprendre la notion de contrainte qui s'en dégage.

La Figure II.7 donne la représentation en trois dimensions de l'hétérojonction SiGe/Si. La partie supérieure représente le Silicium-Germanium dont le paramètre de maille est contraint à celui du Silicium. Les atomes de Germanium, qui sont plus gros, apparaissent ainsi compressés, leur cortège électronique modifie alors celui des atomes de Silicium voisins ce qui se traduit par une modification des bandes d'énergie du SiGe-contraint par rapport au cas du SiGe relaxé.

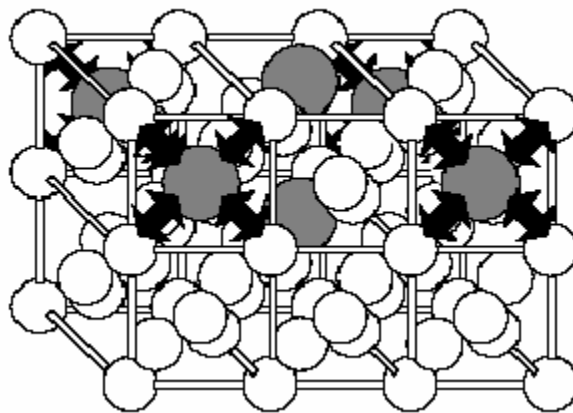


Figure II.7. Exemples de mailles présentes à l'interface SiGe(au-dessus)/Si(au-dessous).

Les flèches noires traduisent de manière symbolique la contrainte sur les liaisons Si-Ge, induite par l'accord de maille forcé du SiGe sur le Si.

La largeur de bande interdite et l'ensemble de la structure de bande du matériau se retrouvent affectés par cette mise sous contrainte, mais la quasi-totalité de l'influence de cette compression de l'alliage SiGe se répercute intégralement dans la bande de valence [39].

II.4. Logiciel de simulation : PC1D

II.4.1. Aperçu du logiciel :

Le logiciel de simulation numérique des cellules solaire PC1D a une réputation internationale dans la recherche photovoltaïque, il a été développé à l'université « New South Wales de Sydney » en Australie ; qui est l'une des pionnières dans ces domaines. Son utilisation est très pratique, il permet de simuler n'importe quelle structure photovoltaïque, selon les matériaux disponibles en fichiers data, en jouant sur les paramètres variables (largeur, surface, dopage, etc...). Les résultats de la simulation, sont très proches des résultats expérimentaux, donc c'est un gain de temps et d'argent.

La fenêtre du logiciel PC1D est présentée sur la Figure II.8, ce logiciel se divise en

quatre parties, les trois premières sont pour la programmation ; où il faut introduire les paramètres du dispositif, des régions et de l'excitation. La quatrième partie concerne les résultats de la simulation.

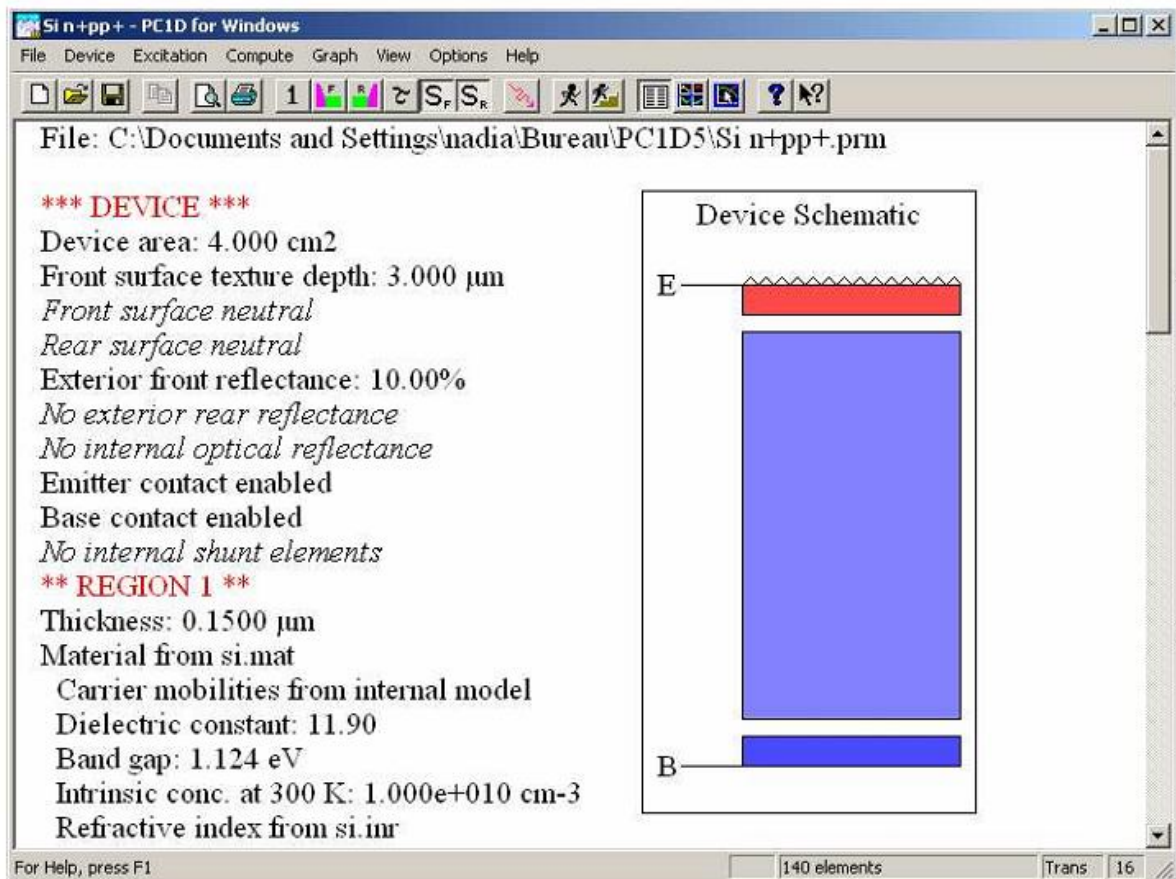


Figure II.8. Fenêtre du logiciel PC1D utilisé en simulation numérique

II.4.2. Les paramètres du dispositif (Device) :

- Aire du dispositif (Device) : la surface du dispositif est très importante car elle influe sur le photocourant d'une manière appréciable. Dans notre simulation, nous avons choisi une surface de 4cm^2 .
- Surface texturée : les surfaces texturées utilisées dans toutes les structures étudiées sont composées de micro pyramides inversées de profondeur (depth) 3_μm et d'angle facial $54,74^\circ$. La texturation est très importante, car elle permet de diminuer les pertes par réflexion du rayonnement incident. Nous avons texturé seulement la face avant, car l'autre face est considérée à l'obscurité.
- Les deux faces sont considérées comme neutres, du fait qu'il n'y a pratiquement pas de charges aux interfaces, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de barrière de potentielle aux surfaces.
- Nous n'avons pas introduit de couches antireflets, car elle est remplacée par la texturation. Cette couche est généralement de la silice (SiO_2), elle peut être remplacée par d'autres matériaux qui sont transparent au spectre solaire et qui sont donnée dans le logiciel sous forme de fichiers.
- Réflectance optique interne : elle est négligée dans notre simulation, nous considérons que les surfaces sont spéculaires et non diffuses c'est-à-dire non rugueuses.

-Par défaut, l'émetteur et la base sont connectés au circuit, tandis que le collecteur est déconnecté.

- Quatre résistances shunt peuvent être introduits, chacune d'elle peut être conducteur, diode ou condensateur. Dans notre cas nous considérons qu'il n'y a pas d'élément qui peut shunter le circuit.

II.4.3. Les paramètres des régions :

- L'épaisseur de l'émetteur est relativement mince par rapport à la base. Dans le cas du silicium elle varie sur un intervalle compris entre 0,1_μm et 2,5_μm.

-Le matériau utilisé: les paramètres qui le décrivent, sont stockés dans des fichiers d'extension (*.mat), ils sont fournis avec le logiciel dans une diskette. Les paramètres stockés dans ce fichier sont :

- .La mobilité : le modèle utilisé est le modèle de Thuber et al 1981.

- .La constante diélectrique.

- .L'énergie de gap (eV).

- .La concentration intrinsèque (cm^{-3}).

- .L'indice de réfraction.

- .Coefficient d'absorption : le modèle utilisé est celui de Rajkanan 1979.

- .Absorption des porteurs libres : l'équation décrivant l'absorption des porteurs libres est : **(equ)**.

- Type et concentration de dopage : de type n ou p, la concentration maximale est de 10^{19}cm^{-3} . Ce logiciel présente quatre profils de dopages : le profil uniforme, le profil exponentiel, le profil gaussien et le profil erfc.

- Les recombinaisons en volume : le modèle utilisé est basé sur la statistique de Read Shockley-Hall décrivant les recombinaisons par pièges, situées dans la bande de valence.

-Les recombinaisons face avant et arrière.

II.4.4. Les paramètres d'excitation :

- Deux fichiers intégrés dans le logiciel permettent de simuler la caractéristique courant-tension et autres caractéristiques en utilisant le fichier « One-Sun.exc », ou la réponse spectrale en utilisant le fichier « Scan-qe.exc ».

- Le mode d'excitation : il y a trois modes d'excitation (en équilibre, stationnaire et transitoire). Pour une bonne simulation numérique, le mode transitoire est vivement recommandé.

- Dans la plus part des cas on choisit la température ambiante, $T=25^\circ\text{C}$.

- Il y a deux sources de Thevenin identiques, l'une pour la base et l'autre pour le collecteur.

- Seulement la face avant est éclairée (coté n), par un flux lumineux d'une intensité de $0,1 \text{ W/cm}^2$. Pour avoir la réponse spectrale, le logiciel fait un balayage sur l'intervalle de longueurs d'onde compris entre [300, 1200] nm. Pour avoir la caractéristique, il utilise directement le fichier d'aire masse « am 15g.spc ».

La seconde source est désactivée, car la face arrière n'est pas éclairée dans notre cas

II.4.5. Les résultats :

Les résultats que nous pouvons visualiser en utilisant le fichier d'excitation « One-Sun.exc » sont :

- La valeur du courant de court circuit.
- La valeur de la tension en circuit ouvert.
- La valeur de la puissance maximale.

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

- La valeur de courant de court circuit.
- La valeur de la puissance maximale.

II.5. Conclusion

L'alliage SiGe est devenu au profil des ans l'un des matériaux les plus intéressants pour l'industrie de la microélectronique. Les chercheurs utilisent maintenant une technique de dépôt de pointe d'épithaxie en phase vapeur sous vide poussé (UHV-CVD) afin d'élaborer des couches minces de SiGe utilisées tant par l'industrie de la microélectronique, pour le développement de nouveaux produits, que par les universités, pour de nouvelles initiatives de recherche.

*CHAP III Simulation des cellules solaires à base de Si et
SiGe*

III.1. Simulation des cellules solaire à base de silicium :

III.1.1. Paramètres de simulation :

Nous avons simulé une cellule de type n^+pp^+ de surface 1 cm^2 avec une texturation à la surface avant pour optimiser le captage du rayonnement

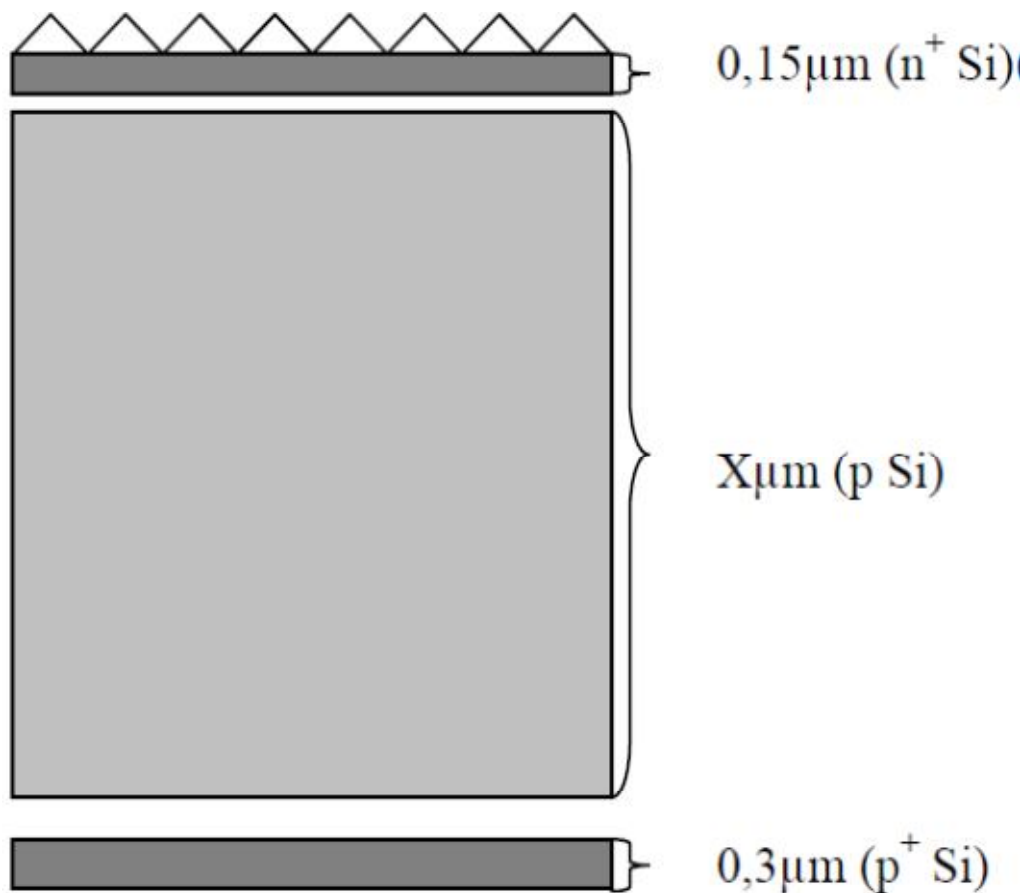


Figure III.1. Schéma de la cellule solaire à base de silicium

Un émetteur classique dopé à 10^{16} cm^{-3} pour la réalisation des cellules solaires, nécessite une épaisseur importante pour une bonne collecte de porteurs. Par contre, les nouveaux émetteurs utilisés actuellement sont dopés à 10^{19} cm^{-3} et nécessite une faible épaisseur. Ce type d'émetteur est appelé Emetteur Transparent et dispose d'un phénomène de diffusion très important. .

III.1.2. Résultats de la simulation :

III.1.2.1. Caractéristique I-V :

La cellule solaire simulée est à base de silicium d'épaisseur $100\mu\text{m}$ dopée à 10^{16}cm^{-3} , de face avant (face éclairée) texturée en pyramides inversées, cette texturation permet une réduction importante du coefficient de réflexion et ainsi des pertes optiques dans la cellule. Le substrat est d'épaisseur $0,3\mu\text{m}$ dopé à 10^{19}cm^{-3} . Les résultats obtenus sont :

$I_{CC}=37.9\text{ mA}$

$V_{co}=693.9\text{ mV}$

$\eta=22.1\%$

$P_{mx}=22.1\text{ mW}$

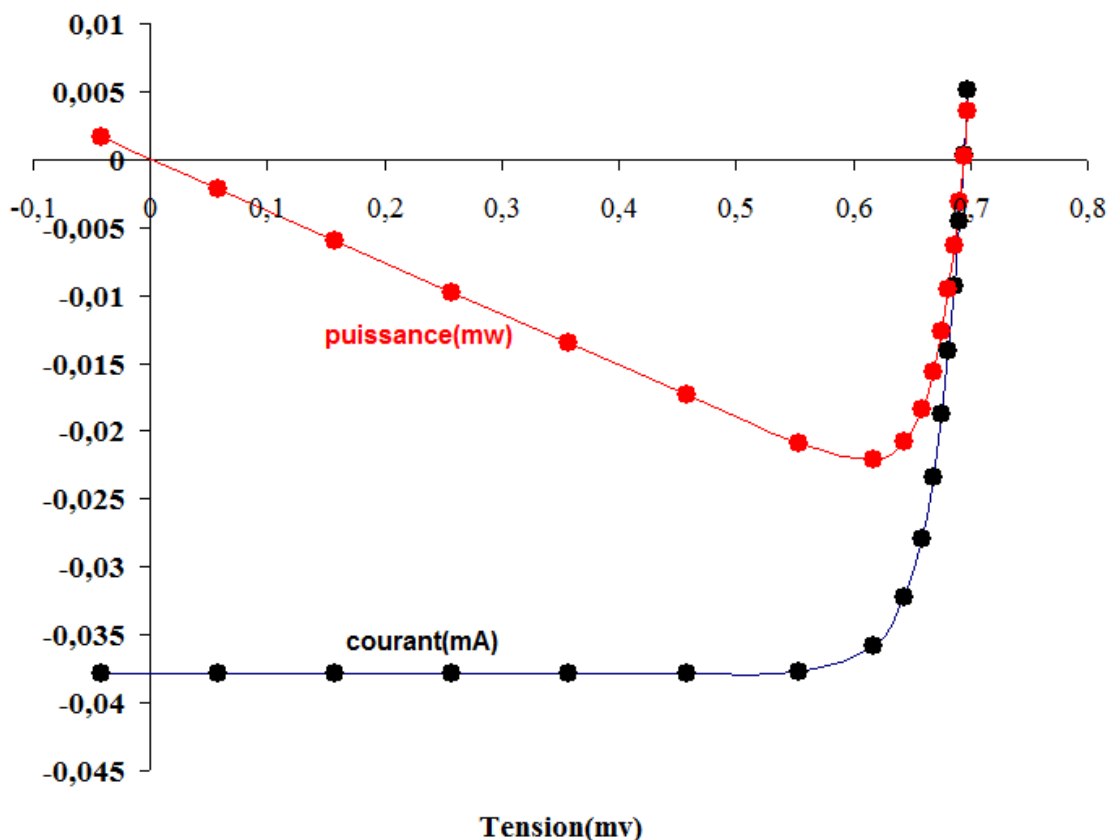


Fig III.2 Caractéristique courant (mA) et tension (mv)

III.1.2.2. Réponse spectrale :

La zone pp^+ engendre un champ électrique interne et joue un rôle important dans le fonctionnement des cellules solaires. En effet, elle a quatre effets sur les

performances des cellules solaires :

Repousser les électrons vers la jonction PN et améliorer le rendement de collecte des porteurs.

Motiver le piégeage des porteurs minoritaires.

Diminuer les recombinaisons en surfaces arrière des porteurs minoritaires.

Augmenter l'absorption optique d'une partie du spectre solaire incident

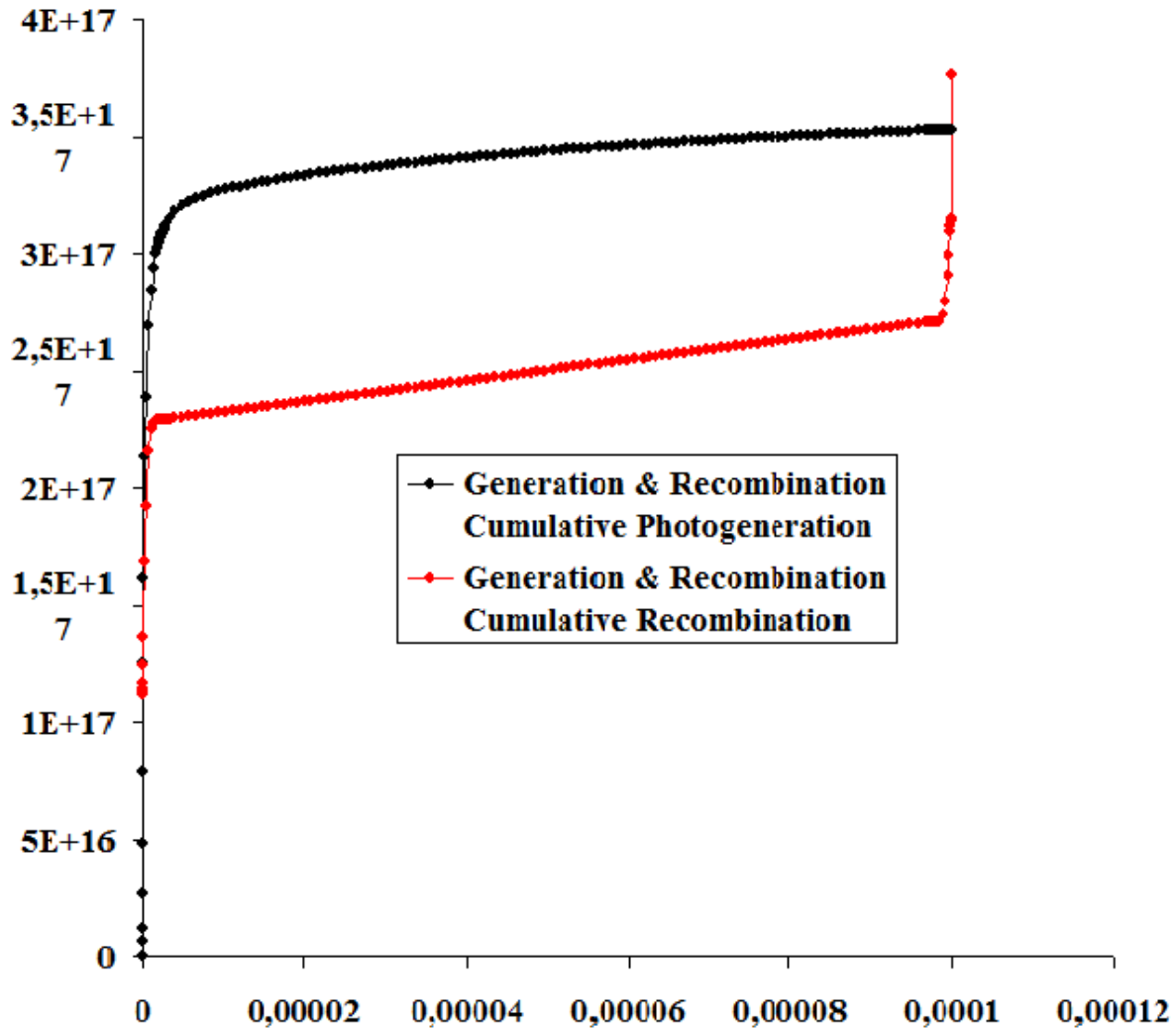


Figure III.3 : la variation de courant (génération et recombinaison) en fonction de l'épaisseur da la cellule

Le tableau suivant résume les paramètres étudiés de la cellule qui peuvent donner un bon rendement :

Epaisseur de l'émetteur	0.15 μm
Epaisseur de la base	100 μm

Epaisseur du substrat	0.3 μm
Dopage de l'émetteur	10^{19} cm^{-3}
Dopage de la base	10^{16} cm^{-3}
Dopage substrat	10^{19} cm^{-3}
Vitesse de recombinaison	1000 cm/s

Tableau III.1. Paramètres de la cellule solaire à base de silicium

III.2. Simulation des cellules solaire à base de germanium:

III.2.1. Paramètres de simulation :

Nous avons simulé une cellule de type n^+pp^+ de surface 1 cm^2 avec une texturation à la surface avant pour optimiser le captage du rayonnement

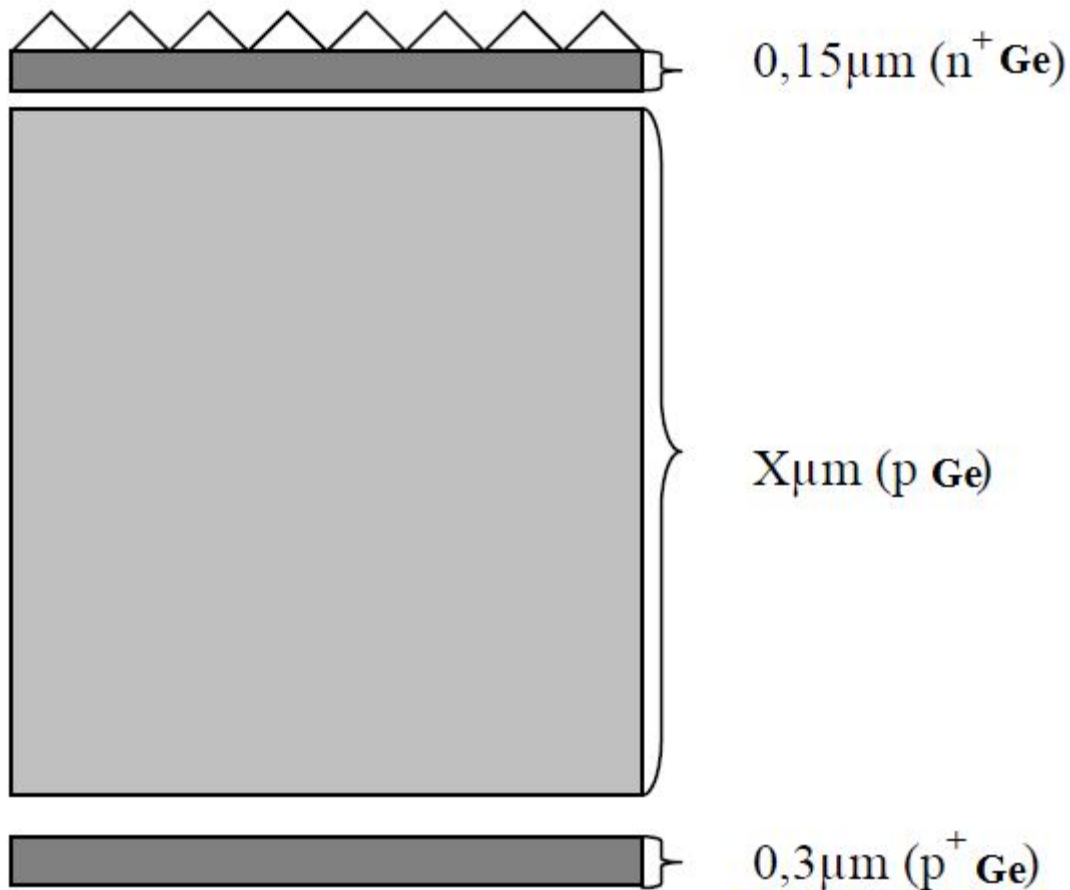


Figure III.4. Schéma de la cellule solaire à base de germanium

III.2.2. Résultats de la simulation :

III.2.2.1. Caractéristique I-V :

La cellule solaire simulée est à base de germanium d'épaisseur 100 μm dopée à 10^{17}cm^{-3} , de face avant (face éclairée) texturée en pyramides inversées, cette texturation permet une réduction importante du coefficient de réflexion et ainsi des pertes optiques dans la cellule. Le substrat est d'épaisseur 0,3 μm dopé à 10^{19}cm^{-3} . Les résultats obtenus sont :

$I_{CC}=55.31\text{ mA}$

$V_{co}=705.8\text{ mV}$

$\eta= 32.4\%$

$P_{mx}=32.4\text{ mW}$

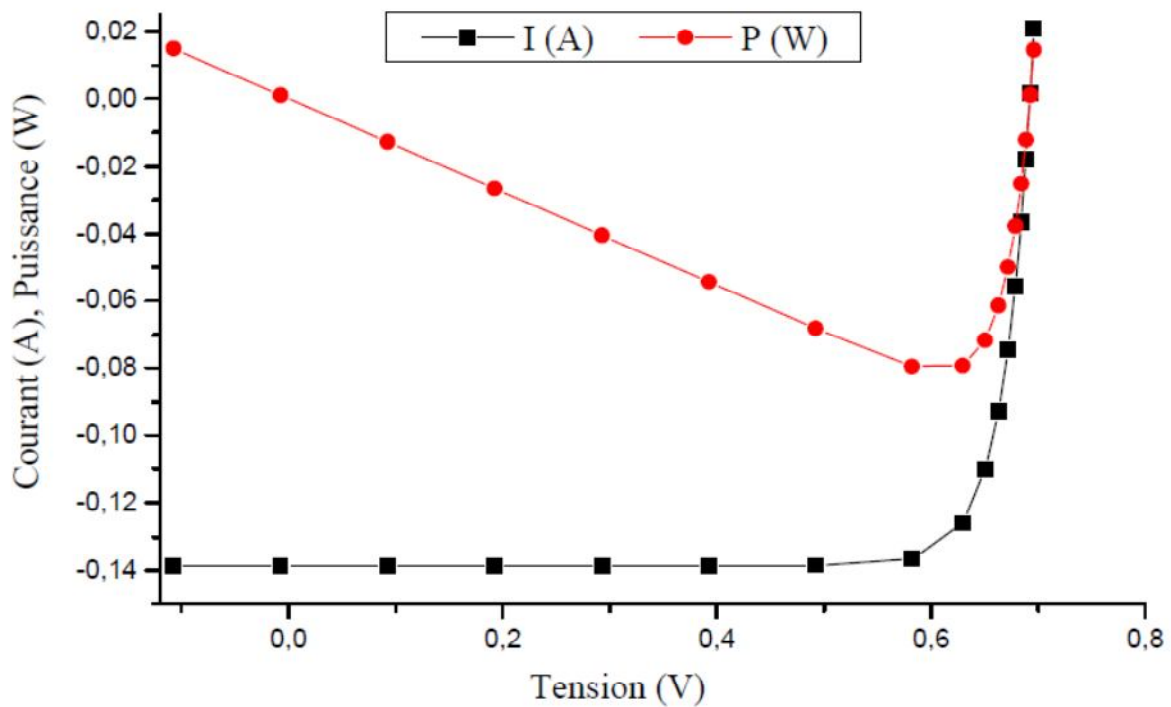


Figure III.5. La caractéristique I-V de la cellule solaire à base de germanium

III.2.2.2. Réponse spectrale :

La zone pp^+ engendre un champ électrique interne et joue un rôle important dans le fonctionnement des cellules solaires. En effet, elle a quatre effets sur les performances des cellules solaires :

Repousser les électrons vers la jonction np et améliorer le rendement de collecte des porteurs.

Motiver le piégeage des porteurs minoritaires.

Diminuer les recombinaisons en surfaces arrière des porteurs minoritaires.

Augmenter l'absorption optique d'une partie du spectre solaire incident

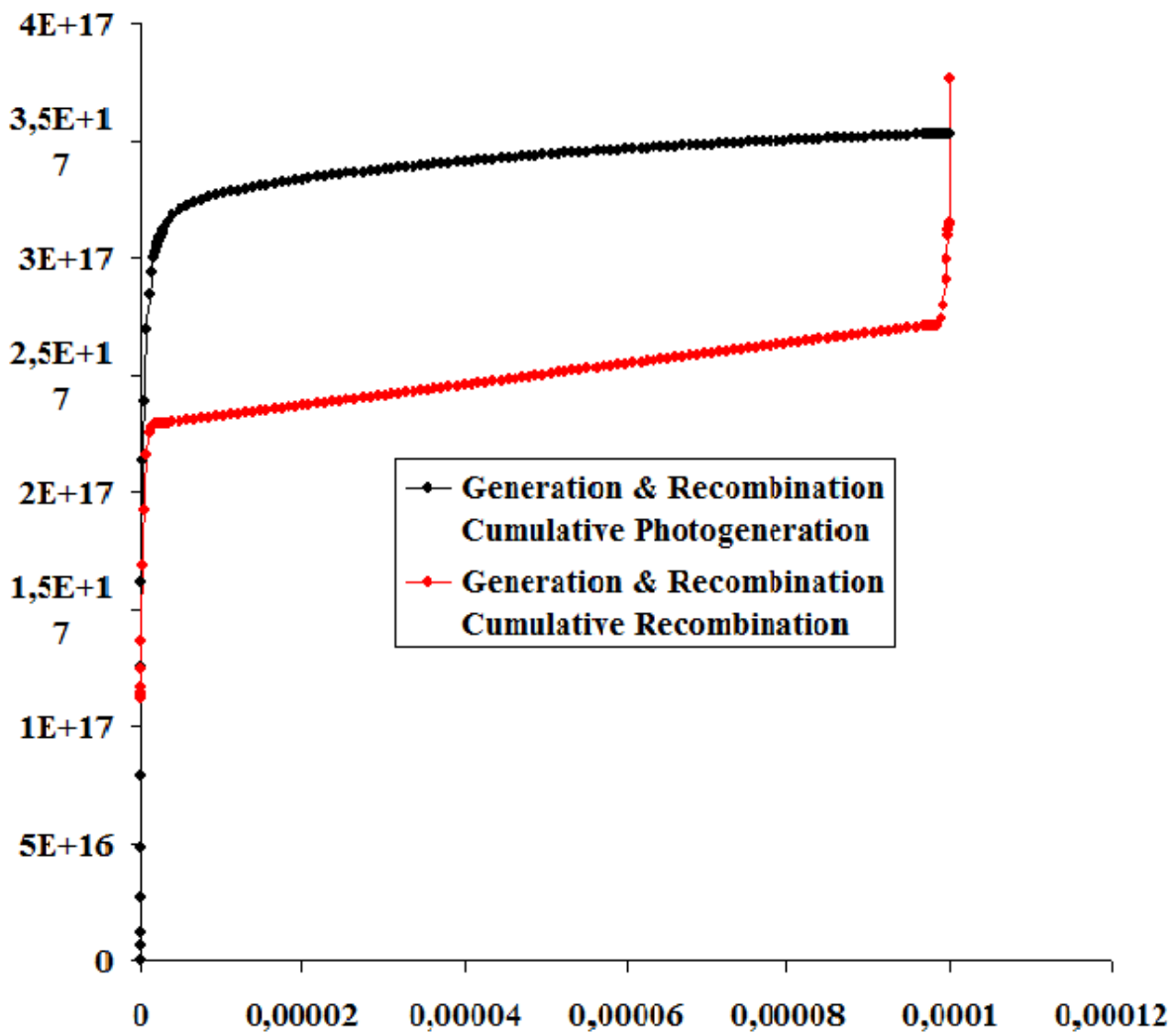


Figure III.6 : la variation de courant (génération et recombinaison) en fonction de l'épaisseur de la cellule

III.3. Simulation des cellules solaire à base de SiGe

Pour pouvoir récupérer les photons d'énergie plus basse que le gap du silicium, il faut trouver un autre matériau semi-conducteur, qui a une énergie de gap plus basse et par conséquent un plus grand coefficient d'absorption dans la partie infrarouge. Le matériau qui répond le mieux à ces exigences est le germanium, mais le plus important, est non seulement le photocourant mais aussi la tension de circuit ouvert, et il se trouve que, malheureusement, le germanium à lui seul ne couvre pas cette exigence de tension élevée.

En effet une cellule solaire au germanium a un courant de saturation plus grand qu'une cellule au silicium, ce qui influe directement sur la tension de circuit ouvert qui est plus basse. Alors, il s'avère plus judicieux de faire un compromis entre la tension et le courant. Ce compromis nécessite un alliage entre le silicium (a un faible courant de saturation donc une bonne tension V_{co}), et le germanium (qui a une bonne réponse spectrale donc un bon photocourant I_{cc}) [37].

Nous avons analysé une cellule solaire à base de SiGe de type $n^+(Si)/p(Si)/p(SiGe)/p^+(Si)$, présentée sur la figure III.8, avec un taux de germanium égal à 25% pour différentes épaisseurs de la base $Si_{1-x}Ge_x$ en utilisant le PC1D.

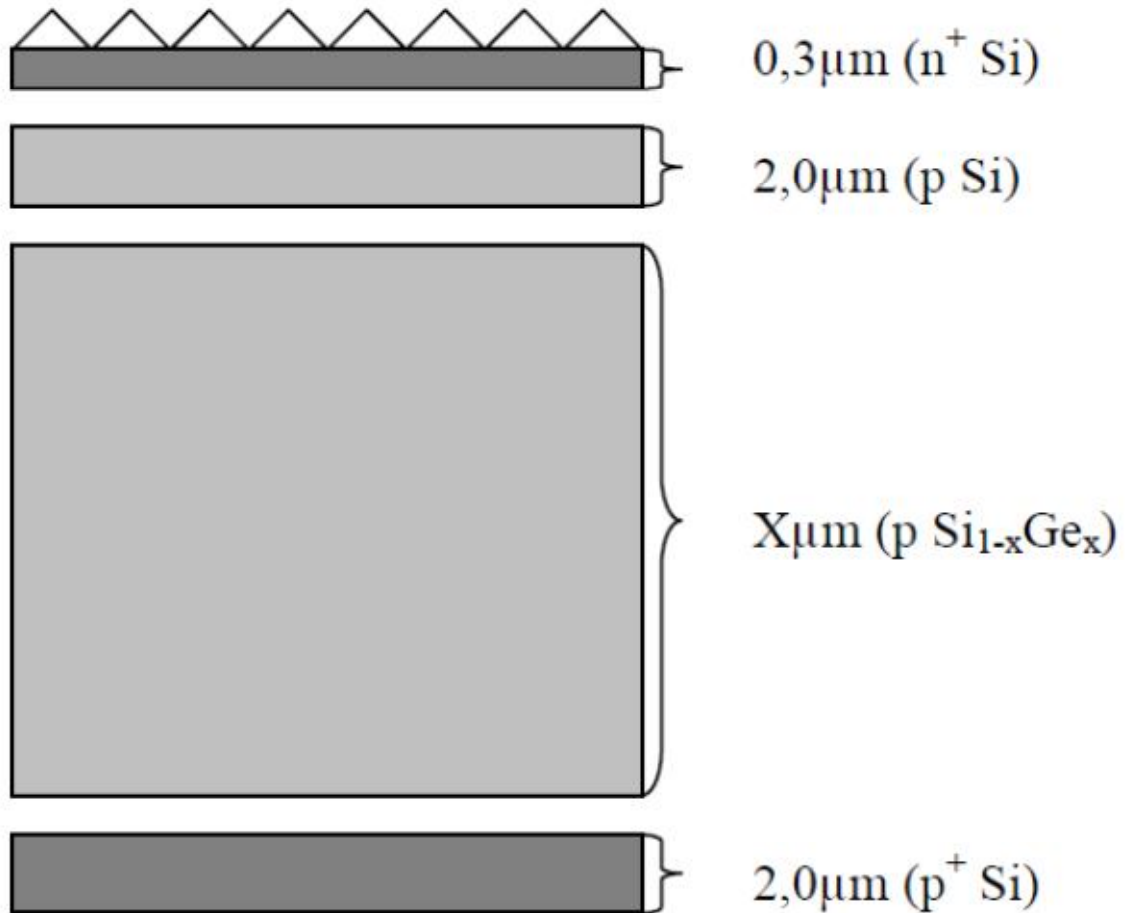


Figure III.7. Schéma de la cellule solaire à base de l'alliage Si_{1-x}Ge_x

Les valeurs des différentes couches utilisées dans la simulation sont données par le tableau suivant :

	Si(n ⁺)	Si(p)	SiGe(p)	Si(p ⁺)
Epaisseurs(µm)	0.3	2.0	100.0	2.0
Concentration du dopage cm ⁻³	10 ¹⁹	10 ¹⁶	2.10 ¹⁶	10 ¹⁹

Tableau.III.2. Epaisseurs et concentration du dopage des couches de la cellule solaire

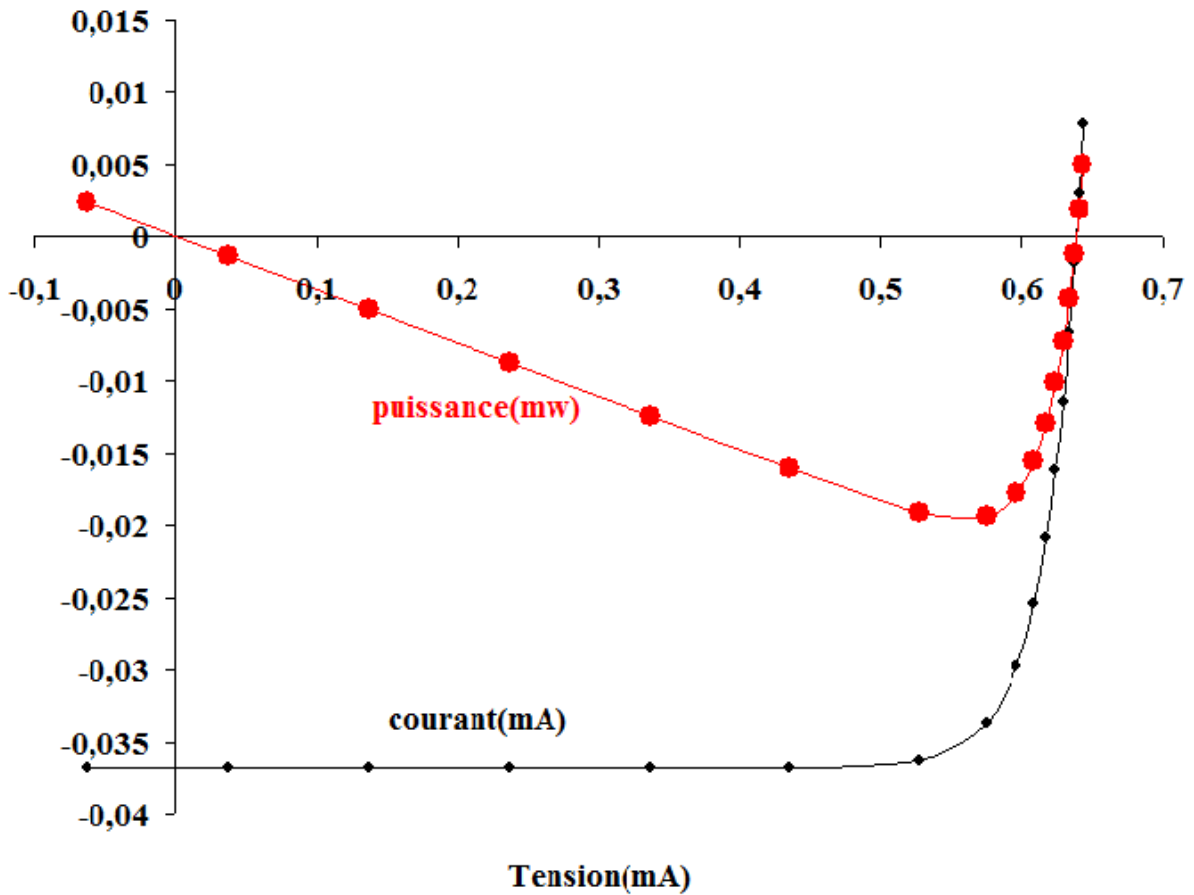


Fig III.8 Caractéristique courant (mA) et tension (mv)

Les résultats obtenus montre que l'épaisseur de la cellule solaire est un paramètre important pour l'absorption des photons. Ainsi, qu'il est pas nécessaire de fabriquer des cellules solaires avec des épaisseurs trop grandes car les réponses spectrales commencent à s'entasser.

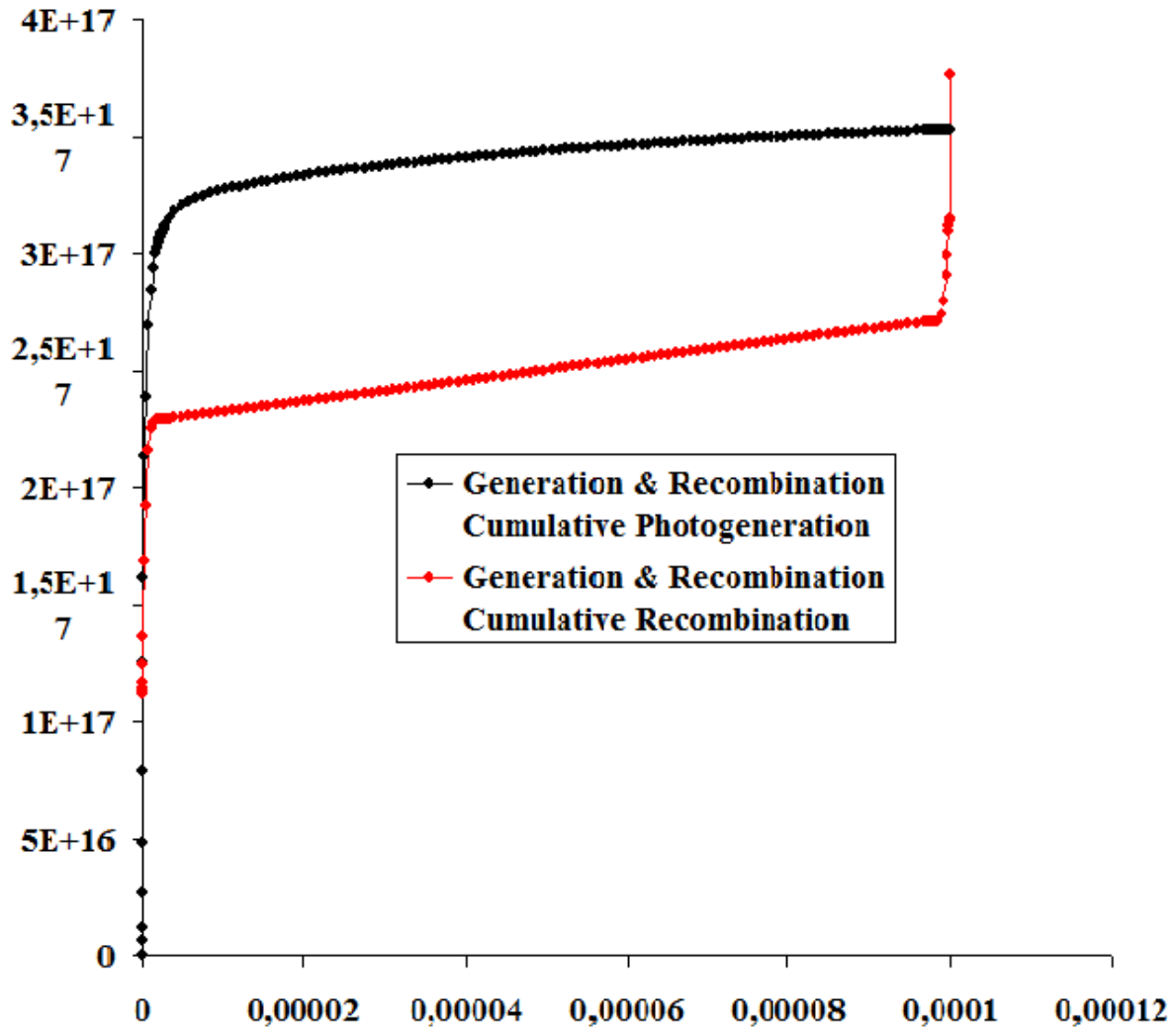


Figure III.9 : la variation de courant (génération et recombinaison) en fonction de l'épaisseur da la cellule

Ge%	0%	25%	50%	75%	100%
Rendement%	22.1	19.5	19	17.7	32.4

Tableau.III.2.1 La variation de le rendement en fonction de la fraction Ge.

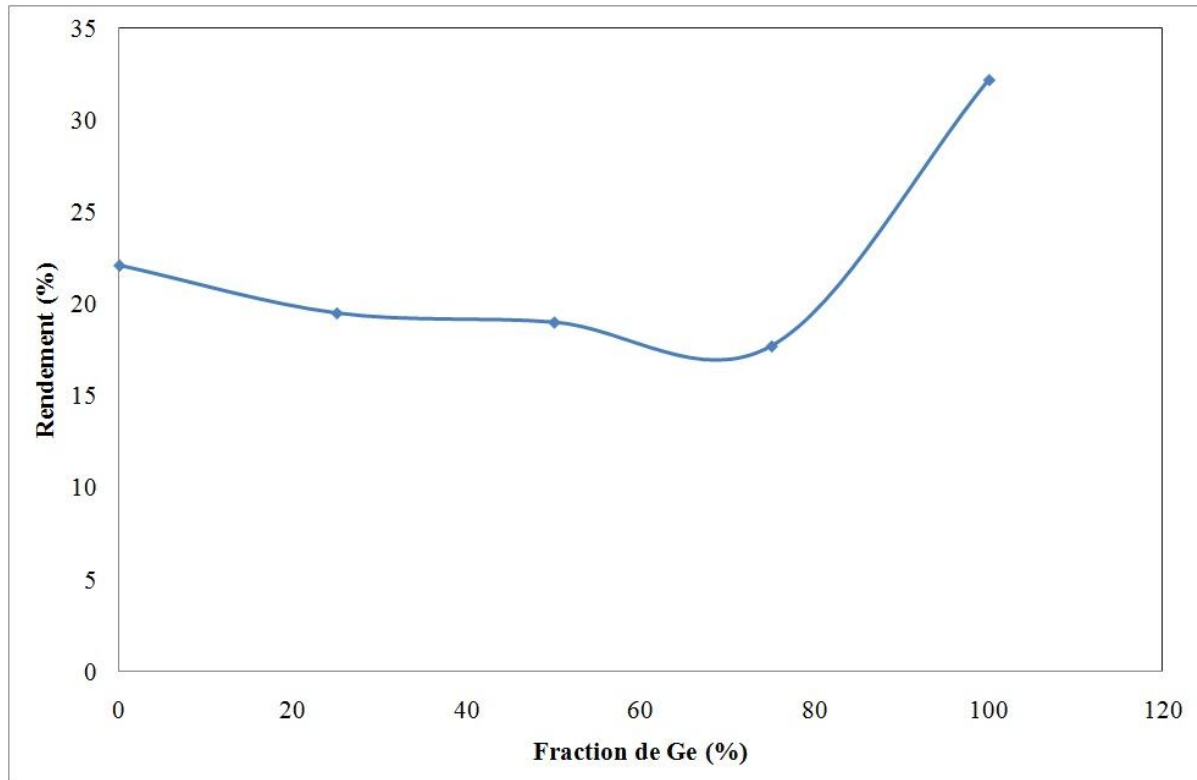


Figure III.10 : la variation de rendement en fonction de la fraction de Ge

D'après le Fig10 on voit que le rendement diminue en fonction de la fraction de Ge dans la cellule PV par contre le rendement de la cellule à base de Ge 100% est très élevé 32.4 ce qui confirme l'ajoute de Ge augmente le rendement de la cellule dans notre cas nous avons pas choisi les bons paramètres de la cellule à base de SiGe

III.4. Conclusion :

Quel que soit la structure d'une cellule solaire, une optimisation de ses paramètres est nécessaire pour avoir un bon rendement. Habituellement, les paramètres à optimiser sont l'épaisseur de la cellule, les niveaux et les profils de dopage, la configuration des contacts et le confinement optique. Les valeurs des paramètres optimaux dépendent, bien sûr, de la structure de la cellule solaire, de la qualité du matériau, de la vitesse de recombinaison en surface (faces avant et arrière), etc... L'optimisation de la cellule solaire comprend donc l'étude de l'influence de ces paramètres sur le rendement afin d'obtenir une structure conduisant au rendement maximum.

III Conclusion générale

III CONCLUSION GENERALE

III CONCLUSION GENERALE :

En pratique, la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique n'est pas totale. Différentes pertes viennent influencer le rendement d'une cellule. Elles sont dans la plus part des cas dues à la nature du matériau et à la technologie utilisée. Tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semi-conducteur ne peuvent générer de paire électron-trou, et sont donc perdus. Le rendement d'une cellule dépend aussi à la base du nombre de photons y pénétrant.

L'industrie photovoltaïque est constituée à plus de 90% sur l'utilisation du silicium comme matériau de base. Le silicium reste cependant le matériau le plus utilisé dans le photovoltaïque, il bénéficie d'une implantation importante et durable dans l'industrie de la microélectronique. Celle-ci utilise du silicium monocristallin de très haute pureté, obtenu par des méthodes telles que le tirage CZ (Czochralski). Ce type de matériau, qui présente d'excellentes qualités électroniques, est très coûteux. La part de silicium monocristallin y est plus importante, puisque les modules produits selon cette technologie ont un rendement plus élevé que ceux en silicium multicristallin.

La simulation a été largement utilisée dans le cadre de ce travail afin d'étudier les paramètres les plus importants pour le fonctionnement des cellules solaires à base de silicium, dans le but de diminuer les pertes et d'optimiser les paramètres physiques et géométriques de la cellule en vue d'obtenir un rendement maximum.

En point de vu technologique, une cellule solaire à base de silicium a un rendement plus élevé et coûte moins cher car il faut uniquement du silane (SiH_4) comme gaz source pour l'épitaxie. Par contre pour le SiGe, il faut du silane et du germane (GeH_4) qui est plus cher, pour l'épitaxie.

L'utilisation des alliages SiGe dans les cellules solaires prend une nouvelle dimensions lorsqu'ils sont utilisés en couches minces, car le rapport performance / coût atteint avec de telles cellules est supérieur à celui d'une cellule au silicium pour la même épaisseur, mais les rendements atteints sont encore faibles par rapport à ce que l'on attend d'une cellule solaire, à cause de la faible épaisseur de la couche.

Les alliages semi-conducteurs, avec la richesse de leurs structures électroniques et autre propriétés, ont trouvé une large application dans les dispositifs optiques et électroniques. La

III CONCLUSION GENERALE

littérature sur les propriétés fondamentales de ces matériaux a rapidement augmenté. Ces dernières décennies, beaucoup de progrès et de découvertes majeurs ont été réalisés. Cependant, étant devant une difficultés majeure pour traiter le désordre dans ces matériaux, la théorie des alliages semi-conducteurs prendra probablement une autre décennie pour être au même niveau de maturité que la théorie actuelle des cristaux semi-conducteurs.

Références Bibliographie

- [1] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [2] F. Dimorth. Next generation GaInP/GaInAs/Ge multi-junction space solar cells 17th European photovoltaic conference, (2001).
- [3] Etude de la conversion photovoltaïque : effets des résistances parasites des photopiles. Laboratoire d'Electronique et de Physique des Interfaces, Institut des Sciences de l'Ingénieur de Nancy, Parc Robert Bentz, 54500 Vandoeuvre, France. P. H. Nguyen, C. Michel et J. Bottin.
- [4] <http://lyc-mgenevoix-ingre.tice.ac-orleanstours.fr/php5/Cours/Cours/Analogique/diod-txt.pdf>
- [5] H. Khachab, 'Modélisation d'une cellule solaire sous concentration'. Mémoire de magistère, CUB Béchar - 2001.
- [6] E. Rosencher, B. Vinter. Optoélectronique. Thomson.CSF. Masson (1997).
- [7] Romain Maciejko. Optoélectronique. Presse internationales polytechnique (2002)
- [8] Mohamed Bouaouina. Contribution à l'étude et à l'optimisation des performances des cellules solaires à base de GaAs et de Si. Mémoire de magister en physique énergétique. Université de Constantine (2001).
- [9] O. Bogdankévitch, S. Darznek, P. Elisséev. Les lasers à semiconducteurs. Edition Mir Moscou.
- [10] Henry Mathieu. Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques, Masson, (1987).
- [11] José Maria Roman. State of the art of III-V Solar cells. Fabrication technologies, Device designs and Application. Advanced photovoltaic cell design (2004).
- [12] L. M. Fraas, 30% efficient InGaP/GaAs/GaSb cell-interconnected-circuits of line-focus concentrator arrays. 16th European photovoltaic conference (2000).
- [13] Z.Abada. Etude des cellules photovoltaïques à base de GaInP et GaAs à haut rendement. Mémoire de magister en électronique. Université de Constantine (2000).
- [14] S.M.Sze. Physics of semiconductor devices. John Wiley and sons (1981).
- [15] M. Belhadj, 'Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque. Mémoire de magistère', Université de Béchar - 2008.
- [16] 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007. Modélisation d'un générateur photovoltaïque dans l'environnement « Matlab ». D.Saheb-Koussa, M.Haddadi.

Références Bibliographiques

- [17] R. Maouedj, 'Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah'. Mémoire De Magistère Décembre 2005.
- [18] N. Chennafi, "Contribution à l'étude physique et à l'optimisation des phototransistors bipolaires à hétérojonction à l'aide d'outils de Simulation numérique : Application au développement d'un schéma équivalent grand signal du phototransistor", Thèse de doctorat, CNAM-Paris, 5 juillet 1999.
- [19] C. Rumelhard, "A Model of Heterojunction Phototransistor to Design Optomicrowave Amplifiers and Mixers", in European Microwave Week Conferences, Optical Technologies for Microwave System's Workshop, Munich, Germany, October 1999.
- [20] J. D. Cressler, "SIGE HBT TECHNOLOGY: A NEW CONTENDER FOR SiBASED RF AND MICROWAVE CIRCUIT APPLICATIONS", in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 46, N°5, pp. 572-589, May 1998.
- [21] D. Paul, "The Physics, Material and Devices of Silicon Germanium Technology", in Physics World, Vol.13, N°2, pp. 27-32, February 2000.
- [22] Silicon Quantum Integrated Circuits Project, web page : www.sp.phy.cam.ac.uk/
- [23] S. M. SZE, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, 1981.
- [24] M. Willander, H.L. Hartnagel, High Temperature Electronics, Chapman & Hall, London, 1997. ISBN: 0-412-62510-5.
- [25] F.P. McCluskey et al, High Temperature Electronics, CRC Press, New York, 1997. ISBN: 0-8493-9623-9.
- [26] Propriétés. <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/Si/Masses>
- [27] S.F. LIOTTA and A. MAJORANA. ITALY. «High field mobility and Diffusivity of an Electron Gas in Silicon devices ».
- [28] « Effective Masses »
www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/Ge/bandstr.htm#Masses
- [29] S. Wolf. R. Tauber. "Silicon Processing for the VLSI Era (Lattice Press. Sunset Beach, California, 1986)"
- [30] R. Braunstein, A. R. Moore and Frank Herman, "Intrinsic Optical Absorption in Germanium-Silicon Alloys", in Physical Review, Vol. 109, N°3, pp. 695-710, February 1958.
- [31] "Properties of strained and relaxed Silicon-Germanium", Edited by E. Kasper, IEE Inspec, emis datareviews series N°12, 1995.
- [32] J. P. Bismukes, L. Ekstrom and R. J. Paff, "Lattice Parameter and Density in

Références Bibliographie

Germanium-Silicon Alloys”, in Journal of Physical Chemistry, Vol. 68, N°10, pp. 3021-3027, October 1964.

[33] R. J. Turton and M. Jaros, “Effects of interfacial ordering on the optical properties of Si-Ge superlattices”, in Semiconductor Science and Technology, Vol.8, pp. 2003-2009, August 1993.

[34] M. Jaros, A. W. Beavis, E. Corbin, J. P. Hagon, R. J. Turton and K. B. Wong, “Effect of ordering, interface imperfections and clusters, and external electric fields on optical spectra of Si-SiGe heterostructures”, in Journal of Vacuum Science and Technology B, Vol. 11, N°4, pp. 1689-1692, July/August 1993.

[35] F. Schäffler, “High-mobility Si and Ge structures”, in Semiconductor Science and Technology, Vol.12, pp.1515-1549, 1997.

[36] S. Krishnamurly, A. Sher, and A.-B. Chen (1985), Appl, Phys. Lett. 47, 160.

[37] T. Manku and A. Nathan, “Lattice Mobility of Holes in Strained and Unstrained Si_{1-x}Ge_x Alloys”, in IEEE Electron Devices Letters, Vol. 12, N°12, pp. 704-706, December 1991.

[38] T. Manku, J. M. McGregor, A. Nathan, D. J. Roulston, J.-P. Noël and D. C. Houghton, “Drift Hole Mobility in Strained and Unstrained Doped Si_{1-x}Ge_x Alloys”, in IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 40, N°11, pp. 1990-1996, November 1993.

[39] R. People, “Physics and Applications of Ge_xSi_{1-x}/Si Strained-Layer Heterostructures”, in IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-22, N°9, September 1986.