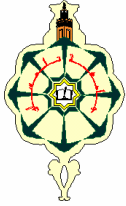


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abou-Bekr BELKAÏD –Tlemcen–Département de Physique
ECOLE DOCTORALE « ENERGIES RENOUVELABLES »



UNITE DE RECHERCHE DES MATERIAUX ET ENERGIES
RENOUVELABLES



Mémoire De Magister

Spécialité : Physique Energétique et Matériaux

Sur le Thème

Optimisation de la grille de collecte des
cellules solaires conventionnelles à base de
silicium multicristallin

Présenté par : M^{elle} BOUYELFANE Asmaâ

Soutenue : Décembre 2009

Devant le jury composé de :

Président : N.CHABANE SARI

Professeur, Université de Tlemcen

Directeur de Thèse : A.ZERGA

Maître de conférences, Université de Tlemcen

Co-Directeur de Thèse : B.BENYOUCEF

Professeur, Université de Tlemcen

Examineur : K.GHAFFOUR

Professeur, Université de Tlemcen

Examineur : A.MERAD

Maître de conférences, Université de Tlemcen

Année universitaire : 2009 - 2010

Remerciements

Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Ce travail a été effectué dans l'Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables (URMER) de la faculté des sciences.

Je remercie vivement monsieur **A.ZERGA**, maître de conférences à l'université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen, de m'avoir accueilli pour ce mémoire, il a su me faire profiter de son abondante expérience, tant théorique que pratique. Je l'exprime également toute ma gratitude pour son soutien constant et ses multiples coups de main. Cette année passée sous sa direction fut très enrichissante, à la fois sur le plan scientifique et sur le plan humain.

Monsieur le professeur **A. BENYOUCEF**, qui m'a fait l'honneur de faire la co-direction de ce mémoire, je lui exprime mon respect et mes sincères remerciements.

J'exprime mes sincères remerciements à monsieur **N.CHABANE SARI**, professeur à l'université Abou-bekr Belkaïd Tlemcen, d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Je remercie sincèrement monsieur **K.GHAFFOUR** professeur à l'université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen, et messieurs **A.MERAD**, maître de conférences à l'université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen d'avoir accepter de faire partie du Jury.

Enfin, j'adresse mes vives reconnaissances à tous les membres de l'«**URMER**» sans oublier les étudiants.

Dédicaces

A

Mes parents

Mes frères

Mes amies

Sommaire

<u>Introduction</u>	1
---------------------------	---

Chapitre I : La structure métal-semiconducteur

1. Introduction	4
2. Interface entre deux matériaux différents	4
2.1. Travail de sortie	4
2.2. Affinité électronique.....	5
2.3. Effet Schottky.....	7
2.4. Etats de surface et d'interface	9
3. Diagramme des bandes d'énergie.....	11
3.1. Cas où $q\phi_m = q\phi_s$	11
3.2. Cas où $q\phi_m > q\phi_s$	12
3.3. Cas où $q\phi_m < q\phi_s$	14
4. La diode Schottky	15
4.1. La diode Schottky non polarisée.	15
4.2. La diode Schottky polarisée en direct.....	18
4.3. La diode Schottky polarisée en inverse.	20
4.4. Comparaison diode Schottky et diode PN.....	22
5. Contact ohmique.....	23
6. Mécanismes de conduction dans un contact	25
7. Résistance de contact et résistance spécifique de contact	27
8. Mesure de la résistance spécifique	28
Bibliographie du chapitre I.....	31

Chapitre II : Les techniques de métallisation

1. Introduction	33
2. Métallisation	33
3. Photolithographie.....	34
4. L'évaporation sous vide.....	37

4.1. Définition.....	37
4.2. Principe.....	38
4.3. Équipement.....	39
4.4. Principales utilisations.....	39
4.5. Avantages et inconvénients de l'évaporation sous vide.....	39
5. Sé	
rigraphie.....	40
5.1. Principe de la technique	40
5.2. La technologie de sérigraphie.....	42
5.3. Qualités de la sérigraphie	46
5.4. Limitations et tendances dans la sérigraphie des contacts.....	46
6. Conclusion	47
Bibliographie du chapitre II.....	48

Chapitre III : Bilan des résistances dans une cellule photovoltaïque

1. Introduction.....	50
2. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire	50
3. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	52
4. Schéma électrique équivalent	55
5. L'influence des résistances ohmiques.....	56
6. Caractéristiques électrique et paramètres de la cellule photovoltaïque	57
7. Pertes physiques et technologiques	59
8. Les technologies photovoltaïques.....	62
8.1. Le silicium multicristallin	62
8.2. Méthode standard de fabrication d'une cellule photovoltaïque en silicium multicristallin	64

9. Perte de puissance par les résistances ohmiques.....	67
10. Conclusion	69
Bibliographie du chapitre III.....	70
<u>Chapitre IV : Résultats et discussions</u>	
1. Introduction	72
2. Programme de simulation	72
3. Relation entre l'ombre et la résistance série.....	74
4. Effet de la résistance carrée de l'émetteur et de la largeur des doigts	78
5. Impact de l'espacement des doigts sur la résistance d'émetteur	82
6. La largeur du busbar	83
7. Contribution des composants résistifs à la résistance série.....	84
8. Conclusion.....	87
Bibliographie du chapitre IV.....	88
<u>Conclusions générales et perspectives</u>	89

Chapitre I

La structure métal-semiconducteur

1. Introduction

La structure Métal-Semiconducteur (M-SC) est le dispositif *unipolaire* le plus simple. Il est à la base d'un grand nombre de structures plus complexes. *Dispositif unipolaire* : un seul type de porteurs (électrons ou trous) participe de façon importante à la conduction du courant et détermine les conditions de fonctionnement du dispositif.

Souvent l'application d'une tension à une structure M/SC produit une caractéristique $I(V)$ non symétrique. La structure se comporte comme un redresseur : c'est une *diode Schottky*. Certaines structures M/SC peuvent présenter des caractéristiques $I(V)$ très symétriques, ce sont alors des *contacts ohmiques*.

Les structures M/SC sont particulièrement bien adaptées à la technologie silicium. Elles sont souvent réalisées en ouvrant une fenêtre dans une couche d'oxyde et en déposant sous vide un film métallique qui entre en contact intime avec le semiconducteur [3].

2. Interface entre deux matériaux différents

Les composants électroniques utilisent de plus en plus les propriétés d'hétérostructures réalisées par la juxtaposition de matériaux différents. Nous allons définir ici les grandeurs qui caractérisent les interfaces et conditionnent les transferts de charges entre les différents matériaux.

2.1. Travail de sortie

Le problème essentiel dans l'étude des hétérostructures est la détermination de la barrière de potentiel qui caractérise les différentes interfaces. Cette barrière conditionne le passage d'un électron ou d'un trou d'un matériau à un autre. Elle est déterminée comme étant l'énergie minimale à fournir à un électron pour l'amener à un niveau du vide.

Considérons tout d'abord le cas du métal où l'électron de conduction est soumis à un ensemble de forces dont la résultante est nulle. De ce fait, cet électron est libre de se déplacer, sous l'action d'un champ appliqué par exemple. Ainsi, il peut atteindre la surface du métal lorsque la compensation des forces dues aux ions n'est plus totale, de sorte que l'électron est retenu à l'intérieur du métal. Pour extraire cet électron, il faut alors lui fournir de l'énergie. Au zéro degré absolu, tous les électrons libres sont situés au-dessous du niveau de Fermi et l'énergie minimum qu'il faut fournir pour extraire un électron du métal est

l'énergie nécessaire à l'extraction d'un électron du niveau de Fermi. Cette quantité est appelée *Travail de sortie* du métal. On l'appellera $q\phi_m$ et elle est considérée comme une caractéristique du métal (*Figure I.1*).

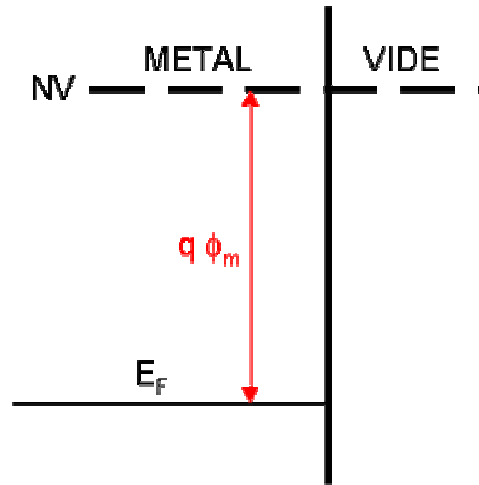


Figure I.1 : Travail de sortie d'un métal.

Le tableau (I.1) donne le travail de sortie de certains métaux utilisés en électronique ou en optoélectronique [1]. Le travail de sortie d'un métal est donc :

$$q\phi_m = NV - E_F \quad (I.1)$$

Métaux à faible travail de sortie						
	Li	Na	K	Rb	Cs	Fr
(eV.)	2.3	2.3	2.2	2.2	1.8	1.8

Métaux à fort travail de sortie								
	Cr	Fe	Ni	Al	Cu	Ag	Au	Pt
(eV.)	4.6	4.4	4.4	4.3	4.4	4.3	4.8	5.3

Tableau I.1 : Travail de sortie de certains métaux.

2.2. Affinité électronique

Considérons maintenant un semiconducteur ou un isolant, le travail de sortie est défini de la même manière. Cependant, si le travail de sortie est un paramètre spécifique d'un métal, il n'en est pas de même pour un semiconducteur en raison du fait que le niveau de Fermi de ce dernier est essentiellement fluctuant en fonction du dopage. En outre, notons que sauf pour les semiconducteurs dégénérés, il n'y a pas d'électron sur le niveau de Fermi.

Nous caractérisons alors le semiconducteur par un autre paramètre qui est l'énergie nécessaire à un électron situé au bas de la bande de conduction, pour l'extraire du semiconducteur et l'amener dans le vide sans vitesse initiale. Cette énergie représente *l'affinité électronique* et nous l'appelons $q\chi_s$. On définit la même quantité pour un isolant. Ce paramètre est une grandeur spécifique du semiconducteur ou de l'isolant. Le tableau (I.2) donne les affinités électroniques de quelques semiconducteurs et isolants utilisés en microélectronique.

$$q\chi_s = NV - E_c \quad (I.2)$$

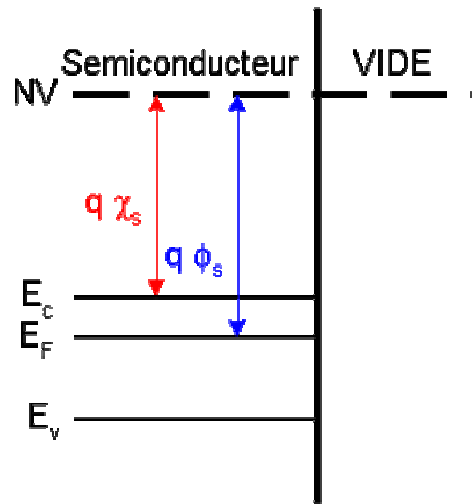


Figure I.2 : L'affinité électronique d'un semiconducteur.

Affinité électronique						
	Si	Ge	GaP	GaAs	GaSb	SiO ₂
(eV.)	4.01	4.13	4.3	4.07	4.06	1.1

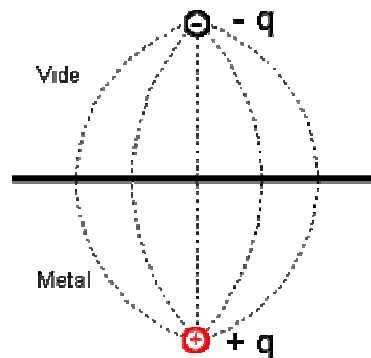
Tableau I.2 : Affinité électronique de certains semiconducteurs.

Ainsi, pour extraire un électron de conduction du métal et l'amener dans le vide, il faut lui fournir une énergie $q\phi_m$; pour extraire un électron de conduction du semiconducteur et l'amener dans le vide, il faut lui fournir une énergie $q\chi_s$. Imaginons que le métal et le semiconducteur soient séparés par un intervalle très faible que l'on fait tendre vers une distance interatomique. Dans ce cas, il faut fournir l'énergie $q\phi_m$ pour extraire l'électron du métal. En effet, cet électron restitue l'énergie $q\chi_s$ en entrant dans le semiconducteur. Il en résulte qu'au niveau de l'interface, la barrière de potentiel que doit franchir l'électron pour passer du métal vers le semiconducteur est donnée par :

$$q\phi_b = q\phi_m - q\chi_s \quad (I.3)$$

2.3. Effet Schottky

Dans ce qui précède nous avons implicitement supposé que l'électron extrait du matériau n'avait plus aucune interaction avec celui-ci. Nous avons négligé le fait que lorsque l'électron est émis par le matériau, il polarise celui-ci. Il en résulte une force de rétention de l'électron par le matériau, c'est *l'effet Schottky*.



On montre (*Figure I.3*) que la force exercée par le matériau sur l'électron émis à la distance x de ce dernier est la même que celle qu'exercerait une charge $+q$ située à la distance $-x$ dans le matériau.

Figure I.3 : Charge image.

Cette charge est appelée *charge image*, la force qui en résulte est la *force image* et le potentiel dont dérive cette force est le *potentiel image*. La force image est donnée par:

$$F = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{(2x)^2} \quad (\text{I.2})$$

Le travail nécessaire pour amener l'électron à l'infini, depuis sa position à la distance x du matériau est donnée par

L'électron extrait du matériau ne passe donc pas brutalement à une énergie potentielle nulle, mais il évolue progressivement vers celle-ci à mesure que son interaction avec le matériau diminue, c'est-à-dire à mesure qu'il s'éloigne de celui-ci. Son énergie ne devient rigoureusement nulle que lorsqu'il est rejeté à l'infini. A la distance x du matériau, son énergie potentielle est égale au travail, changé de signe, qu'il faut fournir pour l'amener à l'infini.

$$W(x) = - \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x} \quad (1.7)$$

Pour des raisons de continuité, cette énergie potentielle tend vers E_F à la surface du matériau. Ceci résulte du fait que lorsque l'électron est dans le matériau la force image disparaît (Figure I.4).

La barrière de potentiel n'est donc pas une fonction du type Heaviside de la forme $qV_{bco} = q\phi_m H(x)$ avec $H(x)=0$ pour $x < 0$ et $H(x)=1$ pour $x > 0$, mais une fonction de la forme :

$$qV_b(x) = q\phi_m - \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x} \quad (1.8)$$

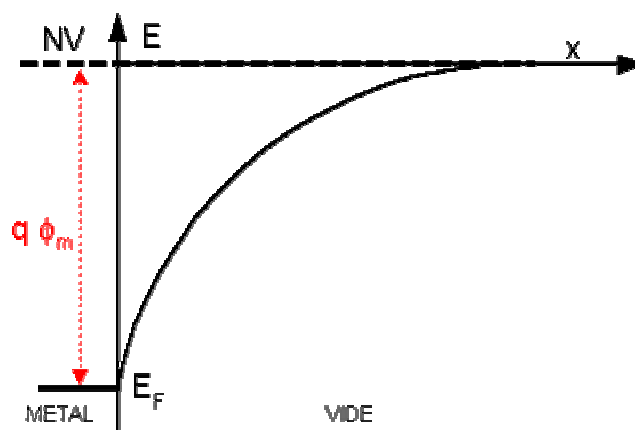


Figure I.4 : barrière de potentiel.

Cette expression montre que le travail de sortie est l'énergie nécessaire pour éloigner définitivement l'électron du matériau. La barrière que doit franchir l'électron conserve la même hauteur $q\phi_m$ mais elle est étalée dans l'espace.

Ceci n'est plus vrai s'il existe un champ électrique à l'extérieur du matériau. En effet, dans ce cas l'énergie de l'électron à l'extérieur du matériau s'écrit :

$$qV_b(x) = q\phi_m - \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x} - qV(x) \quad (I.9)$$

avec $V(x) = -Ex$. Considérons un champ uniforme, dirigé vers le matériau $E(x) = -E$, la barrière s'écrit :

$$qV_b(x) = q\phi_m - \frac{q^2}{16\pi\epsilon_0 x} - qEx \quad (I.10)$$

La barrière de potentiel présente une valeur maximum qV_{bM} en un point x_m (Figure I.5) donné respectivement par :

$$qV_{bM} = q\phi_m - 2qEx_m \quad (I.11)$$

$$x_m = \sqrt{q/16\pi\epsilon_0 E} \quad (I.12)$$

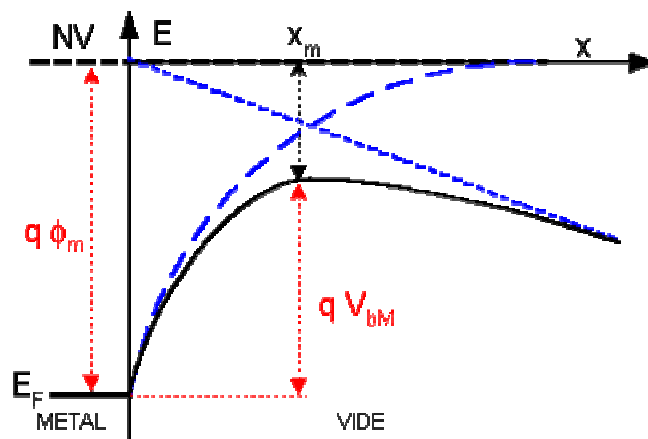


Figure I.5 : barrière de potentiel en présence d'un champ électrique.

Les actions conjuguées du potentiel image et du champ électrique, entraînent donc un abaissement de la barrière de potentiel [1].

2.4. Etats de surface et d'interface

Les états électroniques dans le volume du semiconducteur sont d'une part ceux localisés dans les bandes de valence et de conduction résultant de la périodicité du réseau cristallin, et d'autre part les états discrets associés aux donneurs et accepteurs ou aux centres profonds. A la surface du semiconducteur les états électroniques sont modifiés en raison d'une part d'un phénomène intrinsèque et d'autre part de phénomènes extrinsèques.

Le phénomène intrinsèque résulte de la rupture de la périodicité du réseau. Dans le volume, chaque atome établit des liaisons avec chacun de ses voisins. En surface l'atome n'établit de liaison que dans un demi-plan où il reste un côté vide, appelé conventionnellement par les *liaisons pendantes*. Cette rupture de périodicité entraîne l'existence d'états électroniques différents de ceux existant dans le volume.

A ce phénomène intrinsèque il faut ajouter des phénomènes extrinsèques résultant de l'adsorption à la surface d'atomes étrangers dont les plus courants sont les atomes d'oxygène qui entraînent une oxydation de la surface du semiconducteur et les impuretés métalliques. La présence d'une part d'atomes étrangers et d'autre part de distorsions du réseau, résultant de la différence de maille entre le semiconducteur et son oxyde, entraîne l'existence d'états de surface extrinsèques.

Enfin, si on considère l'interface entre deux matériaux au niveau d'une hétérostructure, le réseau passe à une distance de quelques angströms de la périodicité d'un matériau à celle de l'autre. Il en résulte des états électroniques différents de ceux de chacun des matériaux, ce sont des *états d'interface*. Ces états jouent des rôles différents suivant que les niveaux d'énergie qui leur sont associés soient situés dans le gap du semiconducteur ou dans une bande permise. Dans le fonctionnement des hétérostructures, les états jouant un rôle important sont ceux qui introduisent des niveaux d'énergie permis dans le gap, car ils piègent des porteurs libres et par conséquent ils modifient les populations des bandes permises. Il en résulte qu'au voisinage de la surface, la distance du niveau de Fermi aux bandes permises est modifiée. Mais le niveau de Fermi étant horizontal à l'équilibre thermodynamique, les bandes se courbent vers le bas ou le haut suivant que la population électronique augmente ou diminue. Cette courbure traduit l'existence d'une différence de potentiel entre la surface du semiconducteur et son volume. Si l'énergie du bas de la bande de conduction est E_{cv} dans le volume et E_{cs} à la surface, la différence de potentiel entre la surface et le volume est donnée par :

$$V_s = -\frac{(E_{cs} - E_{cv})}{q} \quad (I.13)$$

On appelle cette quantité par le *potentiel de surface*. C'est la barrière que doit franchir un électron de volume du semiconducteur pour atteindre la surface. Cette quantité s'ajoute à l'affinité électronique pour extraire du semiconducteur un électron de volume, situé dans la bande de conduction.

La figure (I-6) représente le diagramme énergétique d'un semiconducteur de type n, en l'absence d'états de surface (a) et en leur présence (b,c). La figure (I-6-b) représente le cas d'un semiconducteur dans lequel les états de surface créent des niveaux accepteurs en densité relativement faible devant la densité de donneurs, c'est-à-dire devant la densité de porteurs majoritaires à la température ambiante. Il en résulte que ces états de surface, qui piègent les électrons, sont saturés sans trop affecter la densité de porteurs majoritaires, c'est-à-dire la nature du semiconducteur. Au voisinage de la surface le semiconducteur présente une légère courbure de bandes mais il reste de type n. Dans la figure (I-6-c) les états de surface créent des niveaux accepteurs en densité surfacique importante. Il en résulte qu'au voisinage de la surface le semiconducteur devient de type p. De ce fait, il existe une *couche d'inversion* à la surface du semiconducteur. La densité d'états de surface est souvent telle qu'elle entraîne un *ancrage du niveau de Fermi* [1].

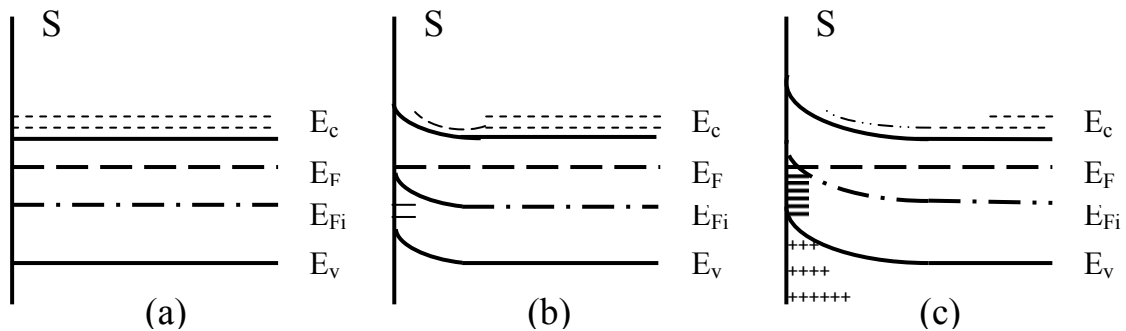


Figure I.6 : Evolution de la courbure de bandes d'un semiconducteur de type n avec la densité d'états accepteurs de surface. E_{Fi} représente le niveau de Fermi intrinsèque.
a) Pas d'états de surface. b) peu d'états de surface. c) beaucoup d'états de surface.

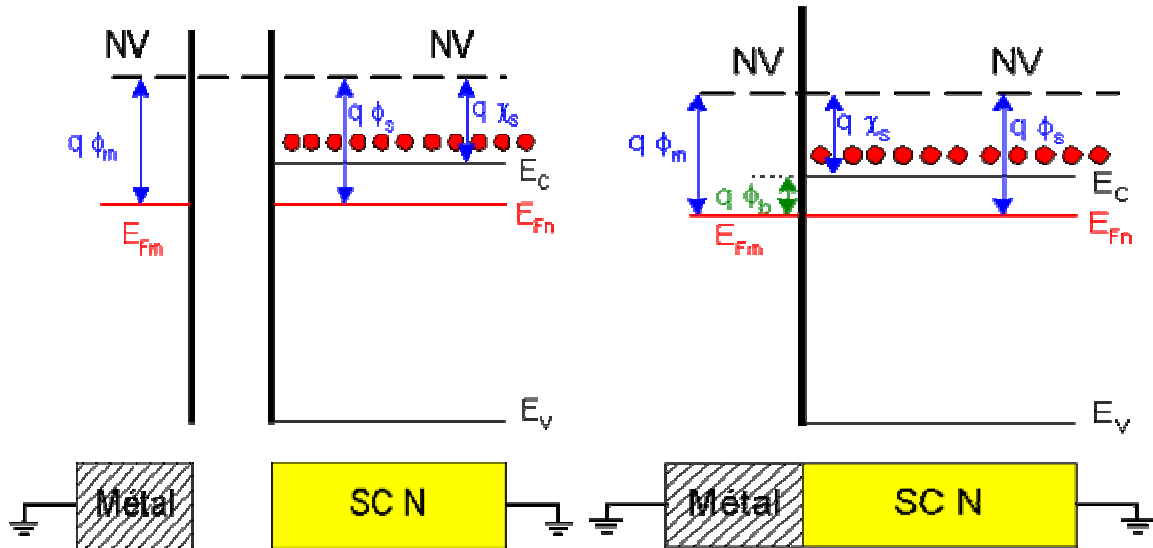
3. Diagramme des bandes d'énergie

Lorsqu'un un métal et un semiconducteur sont en contact, la structure des bandes d'énergie à l'interface est conditionnée par la différence éventuelle entre le travail de sortie du métal : $q\phi_m$ et celui du semiconducteur : $q\phi_s$.

Dans toute l'étude, on considère le contact entre un métal et un semi-conducteur de type "n".

3.1. Cas où $q\phi_m = q\phi_s$

Envisageons le cas où le travail de sortie du métal ($q\phi_m$) est égal au travail



de sortie du semi-conducteur ($q\phi_s$). Les niveaux de Fermi du métal E_{Fm} et du semi-conducteur E_{Fn} sont alignés en l'absence de contact car leur distance au niveau du vide est la même.

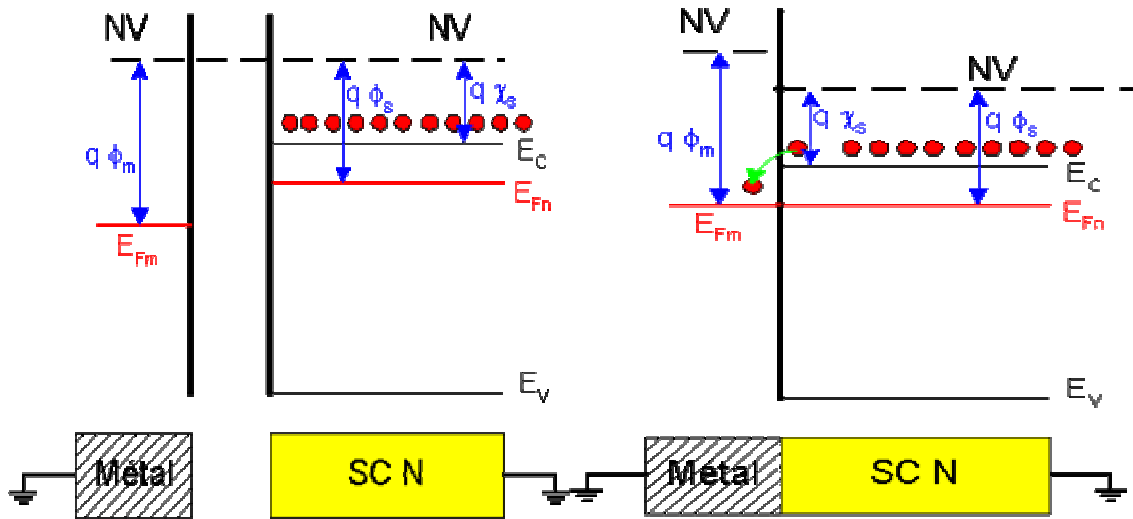
Lorsque le contact est réalisé, les niveaux de Fermi étant déjà alignés, l'équilibre thermodynamique peut se réaliser sans échange de porteurs (ici des électrons). Dans le semiconducteur, la densité des électrons reste constante et la bande de conduction BC (et la bande de valence BV) demeurent plates. C'est ce que l'on appelle par le *régime de bandes plates* (*flat-band*).

La barrière présentée aux électrons qui veulent transiter du métal vers le semiconducteur $q\phi_b$ est donnée par :

$$q\phi_b = q\phi_m - q\chi_s \quad (eV) \quad (I.14)$$

Figure I.7 : Contact métal-semiconducteur avec $q\phi_m = q\phi_s$.

3.2. Cas où $q\phi_m > q\phi_s$



Soit le cas où le travail de sortie du métal $q\phi_m$ est supérieur au travail de sortie du semiconducteur : $q\phi_s$. Lors de la mise en contact du métal et du semiconducteur, les électrons du semiconducteur situés près de l'interface possèdent une plus grande énergie que ceux du métal. Ils vont donc transférer vers le métal en laissant derrière eux les atomes donneurs positifs fixes.

Ce phénomène s'arrête lorsque l'alignement des niveaux de Fermi est réalisé. Une zone désertée (ZCE) apparaît donc dans le semiconducteur. En appliquant l'hypothèse de Shockley, on déduira que cette zone est entièrement dépourvue de porteurs majoritaires sur une épaisseur W . Au delà, la densité des porteurs majoritaire est égale au dopage N du semiconducteur [3].

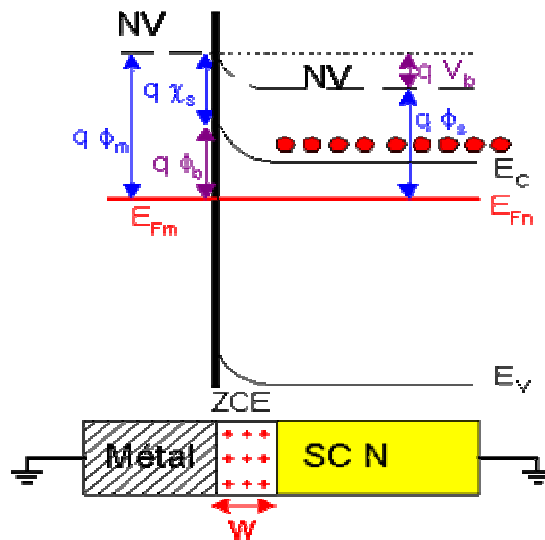


Figure I.8 : Contact métal-semiconducteur(n) avec $q\phi_m > q\phi_s$ à l'équilibre thermodynamique.

Du côté métal, le surplus d'électrons se concentre sur une zone infiniment mince car la densité d'états d'énergie disponibles est de l'ordre de 10^{22} cm^{-3} . A l'équilibre, quand les niveaux de Fermi sont alignés :

- La hauteur de la barrière qui s'oppose au passage des électrons du métal vers le semiconducteur est :

$$q\phi_b = q\phi_m - q\chi_s \quad (\text{eV}) \quad (\text{I. 15})$$

- La hauteur de la barrière qui s'oppose au passage des électrons du semiconducteur vers le métal est :

$$qV_b = q\phi_m - q\phi_s \quad (\text{eV}) \quad (\text{I. 16})$$

V_b est le potentiel de barrière de la ZCE apparue dans le semiconducteur.

Un contact entre un métal (travail de sortie $q\phi_m$) et un semiconducteur (travail de sortie $q\phi_s$) tels que $q\phi_m > q\phi_s$ présente à l'interface un phénomène de ZCE. Dans ces conditions, on parlera d'une barrière métal-semiconducteur ou encore d'une diode SCHOTTKY.

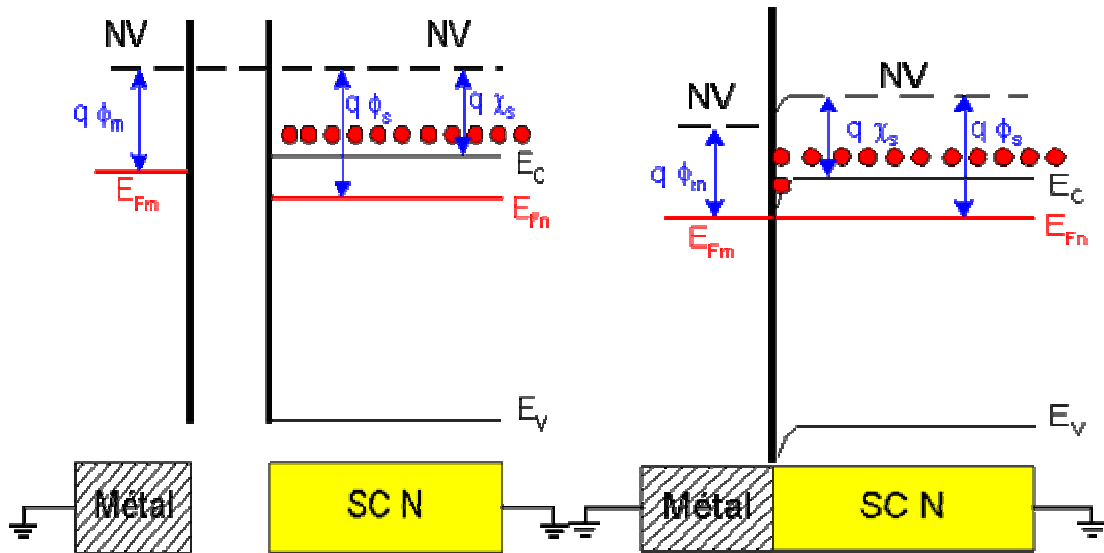
3.3. Cas où $q\phi_m < q\phi_s$

Soit le cas où le travail de sortie du métal ($q\phi_m$) est inférieur au travail de sortie du semi-conducteur ($q\phi_s$). Lors de la mise en contact du métal et du semiconducteur, les électrons du métal situés près de l'interface possèdent une plus grande énergie que ceux du semi-conducteur. Ils vont être donc transférer vers celui-ci.

Il apparaît une zone de déficit de porteurs négatifs dans le métal (phénomène insignifiant) et une accumulation de porteurs majoritaires dans le semi-conducteur. Par conséquent, le niveau de Fermi s'aligne. Il n'existe aucune zone dépourvue de porteurs majoritaires dans la structure. Cette dernière conduira l'électricité dès qu'une tension lui sera appliquée. Le contact est ohmique.

Figure I.9 : Contact métal-semiconducteur(n) avec $q\phi_m < q\phi_s$ à l'équilibre thermodynamique.

Un contact entre un métal (travail de sortie $q\phi_m$) et un semiconducteur (travail de sortie $q\phi_s$) tels que $q\phi_m < q\phi_s$ présente à l'interface un phénomène d'accumulation de porteurs majoritaires dans le semiconducteur. Dans ces conditions, on parlera d'un contact ohmique.



- ❖ Dans le cas d'un contact métal-semiconducteur de type "p", les conditions entre $q\phi_m$ et $q\phi_s$ sont inversées [3].

En résumé, un contact métal-semiconducteur est ohmique ou redresseur suivant la différence des travaux de sortie et le type du semiconducteur :

- Avec $q\phi_m > q\phi_s$: Le contact métal-semiconducteur (n) est redresseur
Le contact métal-semiconducteur (p) est ohmique
- Avec $q\phi_m < q\phi_s$: Le contact métal-semiconducteur (n) est ohmique
Le contact métal-semiconducteur (p) est redresseur [1].

4. La diode Schottky

La diode Schottky exploite l'effet redresseur que peut présenter une structure M/SC et ses propriétés sont similaires à ceux d'une jonction PN. Les premières diodes à l'état solide (diodes des postes à galène) étaient de ce type et furent découvertes par F. BRAUN en 1874 [3].

4.1. La diode Schottky non polarisée.

Considérons une structure M/SC 'n' avec $q\phi_m > q\phi_s$. Nous avons vu que :

- Dans le sens du métal vers le SC il existe :
$$q\phi_D = q\phi_m - q\chi_s \quad (I.17)$$
- Dans le sens semiconducteur vers le métal :
$$qV_D = q\phi_m - q\phi_s \quad (I.18)$$

On suppose que :

- Le dopage N_D du semiconducteur est constant.
- La surface S de la structure est plane.
- La ZCE d'épaisseur W est totalement dépourvue de porteurs majoritaires.
- La densité d'états de surface est négligeable.

Pour calculer l'épaisseur W, on part de la loi de Poisson:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{qN_D}{\epsilon} \quad (I.19)$$

En tenant compte que le champ électrique est nul hors de la ZCE, on intègre l'équation précédente (condition au limite $E(W) = 0$).

$$E(x) = -\frac{qN_D W}{\epsilon} \left(1 - \frac{x}{W}\right) \quad (I.20)$$

En intégrant le champ électrique sur toute la longueur W de ZCE, on trouve:

$$W = \left(\frac{2\varepsilon}{qN_D} V_b \right)^{1/2} \quad (\mu m) \quad (I.21)$$

La figure ci-dessous illustre la barrière Métal-Semiconducteur.

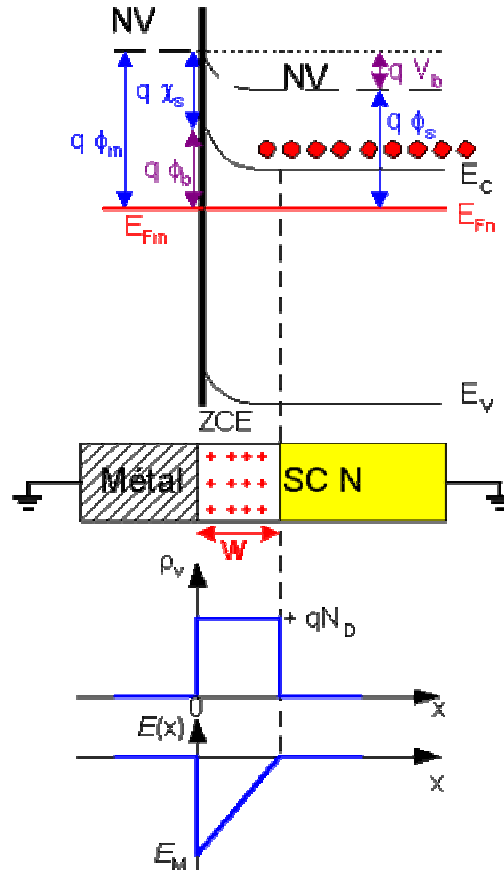


Figure I.10 : La barrière Métal-Semiconducteur.

La présence de la zone de la ZCE génère une capacité statique :

$$C_j(0) = S \left(\frac{q\varepsilon N_D}{2V_b} \right)^{1/2} \quad (pF) \quad (I.22)$$

- Passage des porteurs à l'interface.

Richardson et Dushman ont montré que le *courant d'émission* I_0 d'une cathode métallique (travail de sortie $q\phi$), situé dans le vide, de surface S , portée à la température T est donné par la relation :

$$I_0 = SRT^2 \exp - \left(\frac{q\phi_m}{K_B T} \right) \quad (I.23)$$

avec

:

constante de Richardson.

Dans le cas d'une barrière M/SC, par analogie, on peut exprimer le courant d'émission du métal vers le semiconducteur par la relation :

$$I_0 = SR \cdot T^2 \exp - \left(\frac{q\phi_b}{K_B T} \right) \quad (\mu A) \quad (I.24)$$

Avec $R = R \left(\frac{m_n}{m_0} \right)$

Pour cela on tient compte que l'électron pour quitter le métal doit franchir une barrière $q\phi_b$ (au lieu de $q\phi_m$) et il se retrouve dans le semiconducteur (masse effective m_n au lieu de m_0 : masse dans le vide).

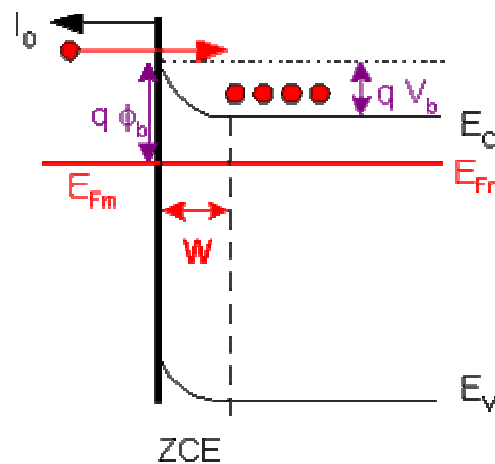


Figure I.11 : Courant d'émission métal \rightarrow semiconducteur.

La structure n'étant pas polarisée et elle n'est traversée par aucun courant, donc le courant d'émission du métal/SC est compensé par un courant de diffusion du SC/métal engendré par les électrons de la bande de conduction qui ont réussi à franchir la barrière de potentiel (qV_b) créée par la ZCE.

La barrière métal-semiconducteur 'n' où $q\phi_m > q\phi_s$ présente à l'interface du côté SC une ZCE. A l'équilibre thermodynamique (sans polarisation) il existe un courant dû à l'émission d'électrons du métal vers le SC exactement compensé par un courant dû à la diffusion d'électrons du SC vers le métal. Dans cette structure, un seul type de porteurs intervient : les majoritaires, c'est un composant unipolaire

4.2. La diode Schottky polarisée en direct

Appliquons au métal une tension $V_j > 0$ par rapport au semiconducteur. Le Niveau de Fermi du métal diminue de qV_j par rapport au niveau de Fermi du semiconducteur (potentiel $V_j > 0$ appliqué à une charge $-q$)

Dans ces conditions :

- La hauteur de barrière Métal /SC reste la même ($q\phi_b$)
- L'énergie de la barrière de potentiel SC / métal devient :

$$qV_b' = qV_b - qV_j \quad (I.25)$$

La figure suivante représente un contact métal-semiconducteur dans le cas d'une diode Schottky polarisée en direct.

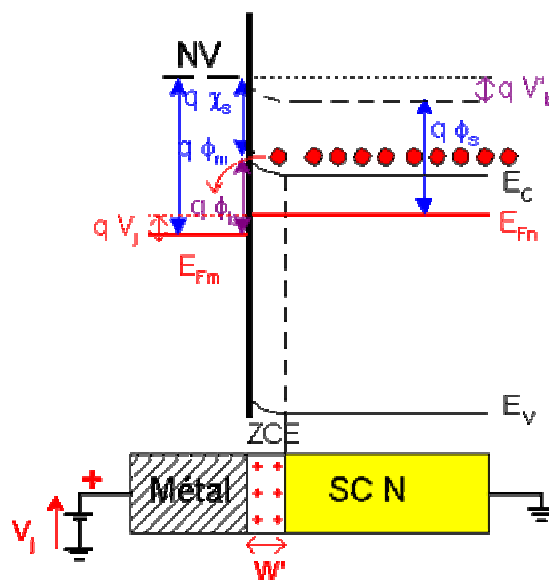


Figure I.12 : La diode Schottky polarisée en direct.

Le courant thermoïonique Métal/SC I_0 n'est plus égal au courant de

diffusion du SC /métal :

Il en résulte un courant direct à travers la barrière :

$$I_d = I_0 \left(\frac{\exp(qV_j)}{K_B T} - 1 \right) \quad (mA) \quad (I.26)$$

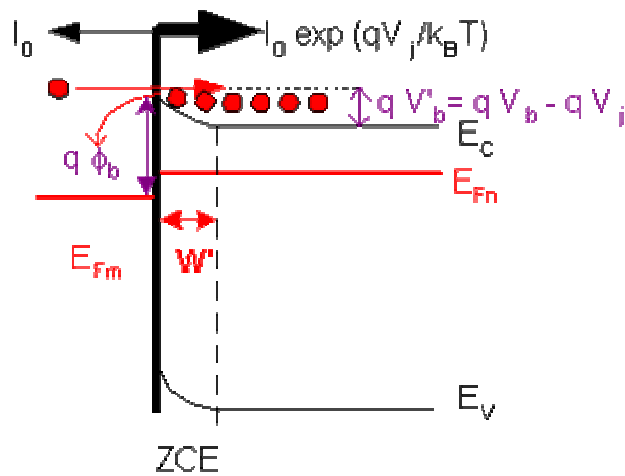


Figure I.13 : Le courant à travers la barrière.

Une analyse plus détaillée met en évidence l'existence d'un courant dû à la diffusion des trous du semiconducteur vers le métal :

$$I_{P_0} = Sqn_i^2 \left[\frac{D_P}{L_P N_D} \right] \quad (nA) \quad (I.27)$$

L'ordre de grandeur entre la quantité de trous (porteurs minoritaires) et la quantité d'électrons (porteurs majoritaires) entraîne que ce courant est négligeable.

La présence d'états de surface entraîne qu'en pratique l'énergie de la barrière Métal/SC ($q\phi'_b$) se situe entre : $q\phi'_b = E_G - qE$ et $q\phi'_b = q\phi_m - q\chi_s$.

Expérimentalement, le courant direct prend la forme suivante :

$$I_d = I_0 \left(\frac{\exp(qV_j)}{nK_B T} - 1 \right) \quad (mA) \quad (I.28)$$

avec n : facteur d'idéalité $1 < n < 2$ (la diode est idéale quand $n = 1$).

Quand on applique une différence de potentiel positive sur le métal par rapport au semiconducteur, la barrière est traversée par un courant qui croît exponentiellement en fonction de la tension appliquée. Comme dans le cas de la jonction PN c'est une polarisation directe.

4.3. La diode Schottky polarisée en inverse.

On porte le métal à un potentiel inférieur à celui du semiconducteur ($V_j < 0$) : le niveau de Fermi du métal augmente de qV_j par rapport au niveau de Fermi du semiconducteur (potentiel $V_j < 0$ appliqué à une charge $-q$)

Dans ces conditions :

- La hauteur de barrière Métal / SC reste la même : $q\phi_b$
- L'énergie de la barrière de potentiel SC / métal devient :

$$qV_b' = qV_b - qV_j \quad (eV) \quad (I.29)$$

Cependant, l'épaisseur de la zone désertée devient :

$$W' = W \left(1 - \frac{V_j}{V_b} \right)^{1/2} \quad (I.30)$$

Plus V_j devient négative, plus l'épaisseur de la ZCE augmente et l'évolution de la capacité statique d'une barrière de surface S s'écrit :

$$\frac{1}{C_j^2(V_j)} = \frac{2(V_b - V_j)}{\epsilon N_D S^2} \quad (pF) \quad (I.31)$$

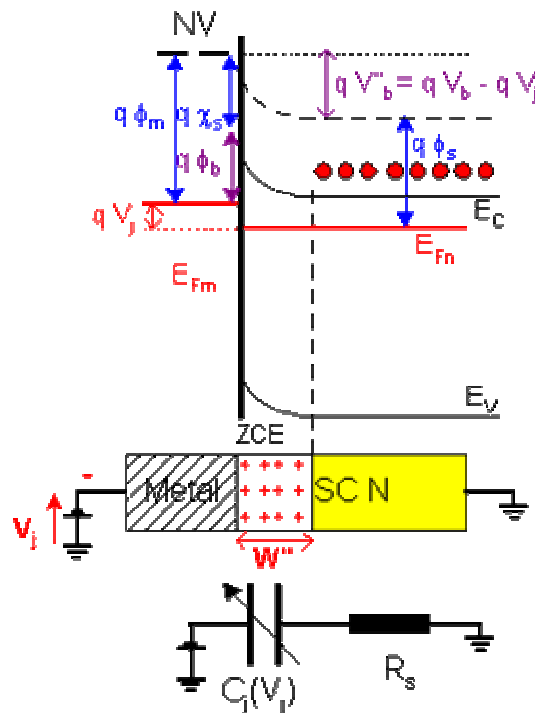


Figure I.14: La diode Schottky polarisée en inverse.

Le courant d'émission d'électrons du métal vers le semiconducteur est toujours présent. Par contre, la barrière de potentiel qV'_b étant nettement plus importante, le courant de diffusion des électrons du semiconducteur vers le métal a complètement disparu. Il en résulte un courant inverse traversant la barrière égale à I_0 .

En pratique, il apparaît une légère augmentation du courant inverse en fonction de la tension appliquée. Ce phénomène trouve son origine dans la diminution de la hauteur de la barrière Métal / SC sous l'effet du champ extérieur :

$$I_0 = SR \cdot T^2 \exp - \left(\frac{q(\phi_b - \Delta\phi_b)}{K_B T} \right) \text{ avec } \Delta\phi_b = \frac{qE_{ext}}{4\pi\epsilon} \quad (I.32)$$

Pour des tensions inverses très grandes (V_j très négative), le champ électrique à l'interface métal-SC devient suffisant pour provoquer un phénomène d'avalanche. La caractéristique $I(V)$ présente une brusque augmentation du courant inverse exactement comme dans la jonction PN.

Quand on applique une différence de potentiel négative sur le métal par rapport au semiconducteur, la diode Schottky est traversée par un courant très faible (elle est bloquante). Son schéma électrique se réduit alors à une résistance série tenant compte de l'épaisseur du semiconducteur et une capacité dont la valeur est fonction de la tension appliquée. Comme dans la jonction PN, on est dans le cas d'une

4.4. Comparaison diode Schottky et diode PN.

La différence fondamentale entre les deux composants est que leur fonctionnement fait appel aux porteurs majoritaires dans la diode Schottky alors que ce sont les porteurs minoritaires qui interviennent dans la diode PN.

La figure ci-dessous illustre une comparaison caractéristique $I(V)$ diode Schottky et diode PN.

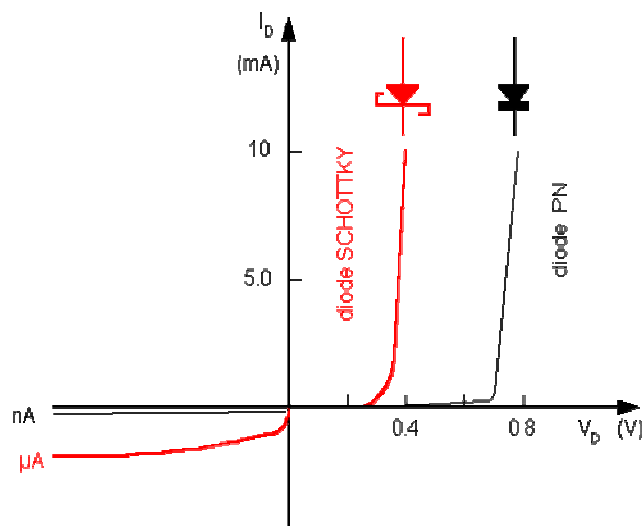


Figure I.15 : Comparaison caractéristique $I(V)$ diode Schottky et diode PN.

Si les caractéristiques $I(V)$ des diodes Schottky et des diodes PN sont assez semblables on peut noter les différences suivantes :

- le courant inverse de la diode PN est plus faible.
- le courant direct "décolle " plus tard pour la diode PN (0.3 V pour Al-Si(n) au lieu de 0.6 V; pour la diode PN).
- la variation de la tension directe en fonction de la température est plus faible pour la barrière M/SC que pour la diode PN).
- le courant inverse est plus sensible à la tension inverse dans la barrière M/SC [3].

5. Contact ohmique

Un contact ohmique est un contact non redresseur. La caractéristique courant tension doit obéir à la loi d'ohm $V = IR$ et la résistance du contact doit être la plus faible possible. Considérons le contact entre un métal et un semiconducteur illustré sur la figure 1.16 dans cet exemple particulier $E_{FM} > E_F$ tel que les bandes d'énergie d'un semiconducteur de type N sont déformées vers le bas près du contact. L'amplitude de la courbure de la bande et son prolongement dans le semiconducteur sont très petits. Comme résultat, il n'y a presque pas de barrière entre le métal et le semiconducteur. Ainsi les électrons peuvent circuler librement à travers le contact, un tel contact est dit ohmique.

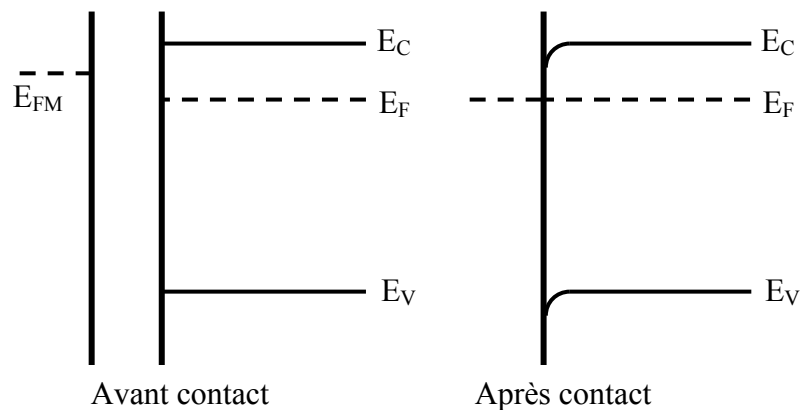
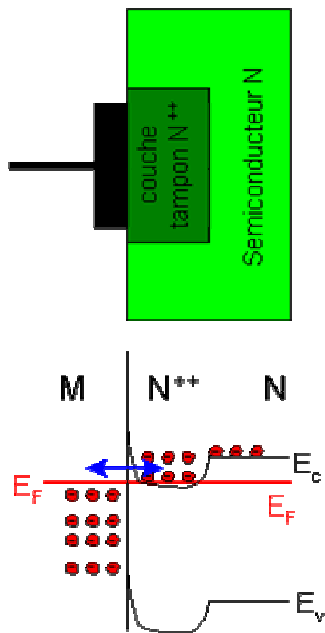


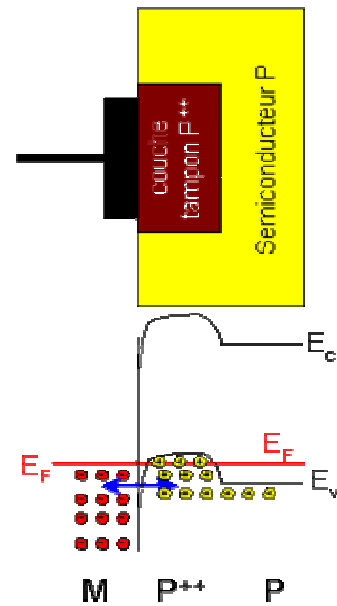
Figure 1.16 : Les bandes d'énergie d'un contact ohmique.

Il est aussi possible d'obtenir un contact ohmique entre un métal et un semiconducteur même dans la forme d'une diode Schottky, tel qu'un métal où $E_{FM} < E_F$ (figure 1.17). En pratique un contact Schottky se comporte comme un contact ohmique si la concentration des impuretés dans le semiconducteur est assez élevée ($N_d = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$). Cependant, la largeur de la ZCE dans le semiconducteur est donnée par l'expression suivante :

$$W(V_j) = \sqrt{\frac{2\epsilon_{sc}}{qN_d} (V_b - V_j)} \quad (1.33)$$



où V_b est intégrée à l'intérieur de la barrière de potentiel et V_j est le potentiel de polarisation n. Si par exemple $N_d = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, $V_b =$



0.5 v, et $V_j = 0$ l'épaisseur de la ZCE est seulement de 2.5 nm. Par conséquent, les électrons peuvent facilement passer par effet tunnel. Une telle fine barrière de potentiel rend la résistance du contact ohmique faible, entre le métal et le semiconducteur [4].

Dans le cas des contacts où le matériau est Silicium, le courant qui circule par effet tunnel devient plus important que celui qui circule par émission thermoïonique quand la concentration des dopants est supérieure à 10^{17} cm^{-3} .

En pratique, les contacts ohmiques entre un métal et les extrémités d'un dispositif semiconducteur sont toujours réalisés sur des zones fortement dopées.

Contact ohmique sur semiconducteur N

Contact ohmique sur semiconducteur P

Figure I.17 : Les bandes d'énergie d'un contact ohmique entre un métal et un semiconducteur fortement dopé.

En pratique, on diminue la résistance du contact en surdopant superficiellement la région sur laquelle nous réalisons le contact. Ainsi, nous réalisons une couche tampon dégénérée (de 10^{19} à 10^{20} cm^{-3}).

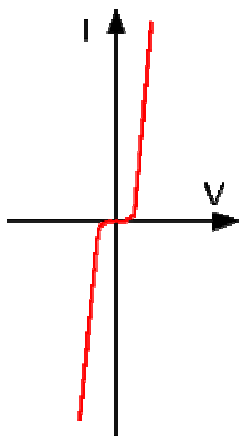


Figure I.18 : Caractéristique $I(V)$ d'un contact ohmique.

La ZCE de la barrière ainsi formée entre la couche tampon et le métal du contact est tellement fine que les porteurs peuvent la traverser par effet tunnel. Le contact n'est plus redresseur et la caractéristique $I(V)$ est symétrique [3].

6. Mécanismes de conduction dans un contact

Pour un semiconducteur de type n, les électrons franchissent la barrière de potentiel entre le métal et le semiconducteur par trois types d'émission.

- 1) *Emission thermoïonique (TE : Thermionic Emission)* : ce type d'émission se produit à faible dopage ($N_D < 10^{17} \text{cm}^{-3}$). Ce processus est activé par l'énergie thermique due à la température à laquelle se trouve le système. Bien que la barrière de potentiel soit nettement supérieure à kT/q , il existe une probabilité non nulle pour que certains électrons aient une énergie supérieure à la barrière de potentiel et puissent la franchir (figure I.19(a)).

Le courant d'émission thermoïonique d'électrons franchissant la barrière de potentiel est donné par :

$$J = R^* T^2 \exp\left(-\frac{\phi_b}{V_T}\right) \left(\exp\left(\frac{V}{V_T}\right) - 1\right) \quad (I.34)$$

J , R^* , T , V_T et V sont respectivement la densité de courant, la constante de Richardson, la température, la tension thermique à l'équilibre et la tension appliquée aux bornes du contact.

- 2) *Emission thermoïonique assistée par un champ (TFE : Thermionic Field Emission)*: elle se produit lorsque le dopage du semiconducteur est relativement élevé, c'est-à-dire compris entre 10^{17} et 10^{19} cm^{-3} . Les électrons sont excités thermiquement jusqu'à une énergie qui leur permet de franchir la barrière de potentiel par effet tunnel (figure I.19(b)).
- 3) *Emission assistée par un champ (FE : Field Emission)* : cette émission se produit lorsque le dopage est suffisamment élevé ($N_D > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) et la barrière de potentiel est suffisamment étroite pour que l'effet tunnel puisse se produire (figure I.19(c)).

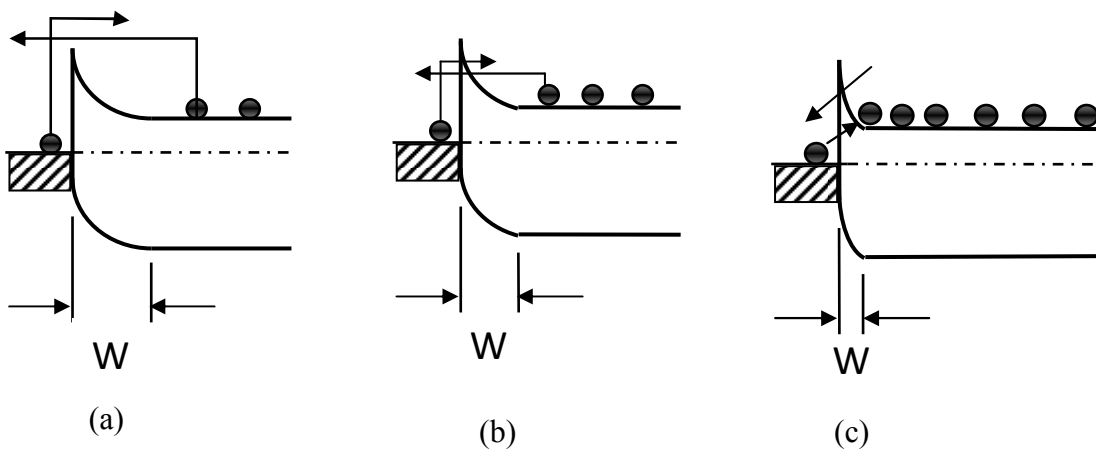


Figure I.19 : Mécanismes de conduction à travers la barrière de potentiel en fonction du dopage du semiconducteur. (a) faible dopage, (b) moyen dopage et (c) fort dopage.

Pour les trois mécanismes de conduction cités ci-dessus, la densité de courant traversant un contact métal-semiconducteur dépend de la tension aux bornes du contact (V) et de la hauteur de la barrière de potentiel (ϕ_b). Cette dépendance varie d'un mécanisme à un autre. Elle peut s'écrire :

$$J = f(V, \phi_b) \quad (I.35)$$

On définit alors la *résistance aux interfaces* de contact $\rho_i(\Omega\text{-cm}^2)$ par :

$$\rho_i = \left(\frac{dV}{dJ} \right)_{V=0} \quad (I.36)$$

Avec cette équation, on détermine la *résistance aux interfaces de contact* pour les trois mécanismes de conduction cités plus haut, que l'on présente dans le tableau I.3.

Emission : TE	Emission : TFE	Emission : FE
	$\rho_i(TFE) = \alpha \cdot C_1 \exp\left(\frac{q\phi_b}{E_0}\right)$	$\rho_i(FE) = \alpha \cdot C_2 \exp\left(\frac{q\phi_b}{E_{00}}\right)$

Tableau I.3 : Relation de la résistance aux interfaces de contact pour les trois mécanismes de conduction dans un contact métal- semiconducteur.

α est une constante égale à $\frac{k}{qR \cdot T} \cdot C_1$ et C_2 sont deux fonctions qui dépendent du dopage N_D , de la température T et de la hauteur de barrière de potentiel ϕ_b .

Un bon contact ohmique exige un fort dopage à l'interface du semiconducteur. Dans ce cas, c'est le mécanisme de conduction *FE* qui domine. L'expression approximative de la *résistance aux interfaces de contact* définie par l'équation (I.36) dans le cas du mécanisme *FE* est donnée par :

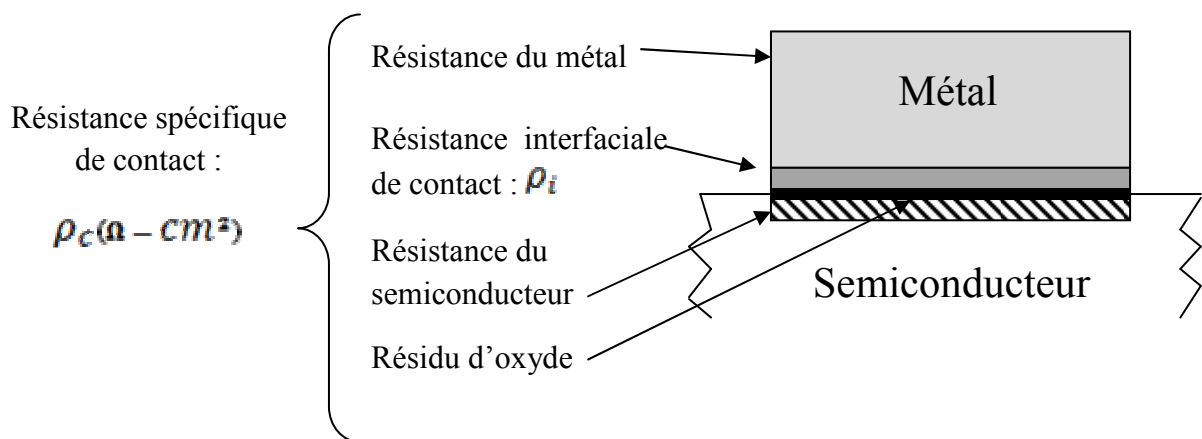
Selon cette relation, ρ_i dépend essentiellement du dopage du semiconducteur.

7. Résistance de contact et résistance spécifique de contact

La *résistance de contact* est une grandeur qui décrit la résistance électrique présente à l'interface entre le métal et le semiconducteur. Elle dépend de la surface et de la géométrie du contact. Cependant, l'interface a elle-même certaines propriétés intrinsèques (dopage du semiconducteur, nature du métal, qualité du contact,...) qui influe la *résistance de contact* indépendamment de la géométrie du contact. Cette propriété aux interfaces est représentée par une grandeur appelée : *résistance spécifique de contact* ρ_c . Elle englobe (Figure I.20) :

- La résistance aux interfaces entre le métal et le semiconducteur ;
- La résistance métallique au dessus de l'interface ;
- La résistance du semiconducteur en dessous du contact ;
- La résistance de toutes les imperfections qui peuvent se trouver à l'interface lors de l'étape de fabrication.

Ainsi, ρ_c est la grandeur qui caractérise un contact réel, contrairement à ρ_i qui est une grandeur théorique. A partir de cette remarque, il est difficile de comparer la théorie à l'expérimentation, car la théorie ne peut pas prédire avec précision ρ_c et l'expérimentation ne peut pas extraire ρ_i avec précision. Dans ce



qui suit on ne parle que de la *résistance spécifique de contact* [2].

Figure I.20 : illustration schématique d'un contact métal-semiconducteur réel à la fin du processus de fabrication.

Théoriquement, la résistance de contact R_c d'une interface métal-semiconducteur est égale à la résistance spécifique de contact ρ_c divisée par la surface A du contact.

$$R_c = \frac{\rho_c}{A} \quad (I.38)$$

Cette définition suppose que toute la surface du contact participe au passage du courant, ce qui en réalité n'est pas vérifié. Ceci s'observe de plus en plus lorsque la surface du contact devient grande [2].

8. Mesure de la résistance spécifique

Pour caractériser les contacts réalisés par sérigraphie sur les cellules solaires à base de silicium multicristallin, nous utilisons la méthode la plus courante, la structure 'Transmission Line Method' (*TLM*) permettant d'extraire la résistance spécifique qui s'exprime en Ohm que multiplie l'unité de surface. Cette méthode consiste à réaliser plusieurs résistances avec différentes longueurs entre les plots de contact. Etant donné que la résistance réalisée varie en fonction de l'écart entre deux plots, il est possible d'en extraire la constante qui représente la résistance de contact [5-6].

La détermination de la résistance spécifique d'un contact ohmique par la méthode dite Transmission Line Method (*TLM*) a été introduite par Shockley. La mesure de la résistance entre deux plots de contacts est la somme de la résistance du semiconducteur et de deux résistances de contacts (figure I.21). La résistance totale s'exprime de la manière suivante :

$$R_T = 2R_c + R_{sc} \quad (I.39)$$

Puisque la résistance du semiconducteur varie en fonction de la longueur séparant les deux plots de contact, il suffit de tracer la résistance totale en fonction de la longueur pour en déduire R_c .

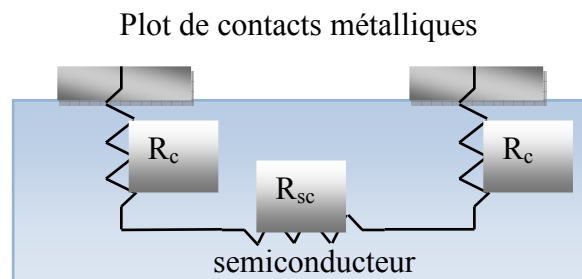
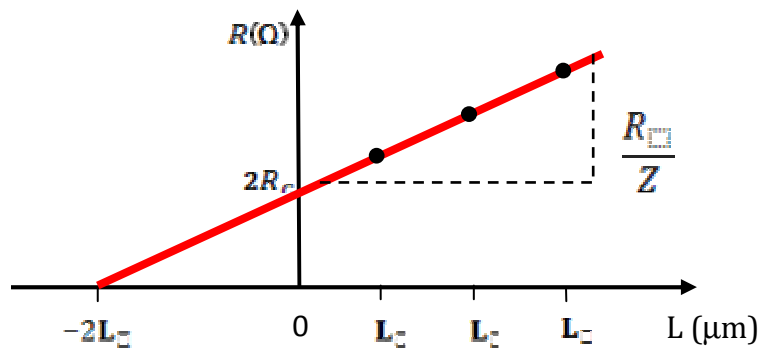


Figure I.21 : Modélisation d'une résistance formée sur un semiconducteur.

Partant de ce principe, la figure représente le motif *TLM* constitué de plusieurs plots séparés par une distance variable. Il faut également que les lignes

de champs restent rectilignes et homogènes. Pour cela, la zone où sont réalisés



les contacts doit être isolée soit en réalisant la structure dans un caisson ou alors par la réalisation d'une structure mesa.

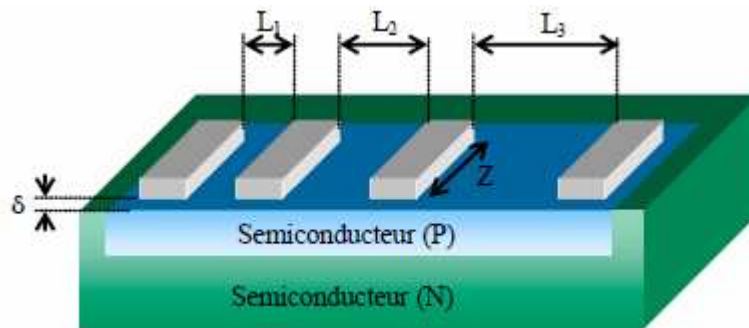


Figure I.22 : Structure TLM.

En traçant ensuite la résistance entre deux plots de contact en fonction de la distance (Figure I.23), on peut en déduire la résistance de contact R_c , la résistance carrée R_\square et la longueur de transfert L_T .

Figure I.23 : Caractéristique de la résistance totale en fonction de la distance des plots.

A partir de ce graphe, on peut en déduire la résistance carrée de cette manière :

et la résistance spécifique ρ_c du contact est :

$$\rho_c = R_\square \times L_T^2 \quad (I.41)$$

Il est ainsi possible d'extraire facilement la résistance spécifique du contact. Il est à noter que le paramètre δ qui est la distance séparant le contact du caisson joue un rôle important. Si cette distance n'est pas négligeable devant la largeur Z des contacts.

Généralement la sensibilité de l'extraction de la résistance spécifique de contact avec les *TLM* est de l'ordre de 10^{-6} cm². Cette limitation est due au paramètre δ qui ne peut être supprimé du fait de la technologie. Dans la technologie, la résolution est de l'ordre de 2 μm et un δ de l'ordre de 10 μm est tout à fait acceptable pour une longueur des plots de 150 μm [5].

9. Conclusion

Afin de bien comprendre le fonctionnement du contact entre la grille de collecte métallique et la cellule solaire en silicium multicristallin (un semiconducteur), ainsi que le comportement des charges au niveau de cet interface, il nous a été plus que nécessaire de présenter ce premier chapitre dans ce manuscrit. Un intérêt particulier a été accordé aux différentes grandeurs caractéristiques et aux conditionnements des transferts des charges associés.

Références Bibliographiques

- [1] **Henry MATHIEU.** « *Physique des semiconducteurs et des composants électroniques* ». 2004, DUNOD 5^e édition, pp.95-101.
- [2] **Slimane OUSSALAH.** « *Test paramétrique appliqué aux circuits intégrés de puissance ASDTM : fiabilité des diélectriques, mesure de la résistance de contact et mesure de la durée de vie* ». Thèse de doctorat. TOURS, 2000.
- [3] **Bernard BOIT'TIAUX** *Cours de l'école Polytechnique de Lille*, 2004
- [4] **Jean-pierre Colinge, Cynthia A Colinge.** « *Physics of semiconductor devices* », pp.149-150. By KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS, 2002
- [5] **Heu VANG.** « *Optimisation des étapes technologiques pour la fabrication de composants de puissance en carbure de silicium* ». Thèse de doctorat. INSA de Lyon, 2006.
- [6] **H. El Omara, J.P. Boyeaux, and A. Laugier,** « *TLM extension for the study of screen printing contacts on multicrystalline silicon* » Eur. Phys. J. AP 2, 87 {92 (1998).

Chapitre II

Les techniques de métallisation

1. Introduction

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

Différents procédés sont utilisés pour réaliser les contacts. Dans le cadre des cellules photovoltaïques industrielles au silicium multicristallin, les contacts sont généralement réalisés par sérigraphie. Pour les cellules photovoltaïques à haut rendement, la photolithographie ou l'évaporation sous vide sont utilisées parfois [1].

2. Métallisation (dépôt de la grille collectrice) :

Dans la technologie de réalisation des cellules solaires, la métallisation est l'étape principale après celles de la formation de la jonction et du dépôt de la couche antireflet. Elle permet d'établir la liaison entre la structure et le circuit extérieur lors de l'assemblage des photopiles dans un cadre rigide ou encapsulation. Un soin particulier est apporté à la définition de la géométrie de la grille collectrice ainsi qu'au traitement thermique après métallisation. [2]

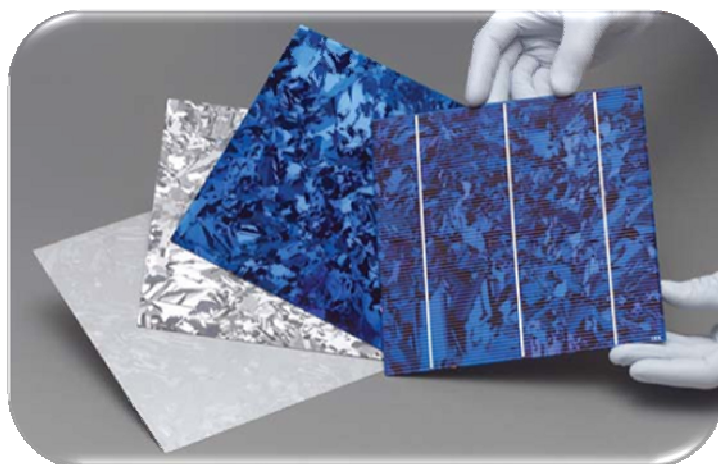


Figure II.1 : Plaques de silicium de 200 mm x 200 mm à divers stades de fabrication d'une cellule photovoltaïque sur la plate-forme Restaure du CEA de Grenoble (de gauche à droite: après découpe par scie à fil, après texturation et formation de l'émetteur, après dépôt de

la couche bleue anti-réfléchissante et après formation des grilles de contact, avant mise en module) [14].

Le processus implique une ou plusieurs étapes de métallisation, ne serait-ce que pour le dépôt des contacts.

Parmi les différentes techniques de métallisation on peut citer :

- La photolithographie.
- L'évaporation sous vide qui utilise un évaporateur à effet Joule.
- La sérigraphie.

3. Photolithographie

La technique mise en œuvre se nomme la *lithographie* qui littéralement signifie « écriture sur pierre ». Son origine remonte à une ancienne méthode d'impression en noir et blanc à partir d'une pierre calcaire sur laquelle est reporté un motif (à l'envers) à l'aide d'une encre, motif qui sera ensuite transféré par contact sur le support à imprimer. On retrouve un grand nombre de dérivés de cette méthode dans les procédés d'imprimerie. Plus récemment, un procédé de ce type a été appliqué à la fabrication de semi-conducteurs, c'est la *photolithographie* [7].

Cette opération consiste à déposer une résine photosensible en film mince (quelques fractions de micromètre à plusieurs micromètres), uniforme, de grande qualité et fortement adhérente. Ces résines sont des composés organiques (généralement des polymères thermoplastiques) dont la solubilité est affectée par le rayonnement *UV*. Il existe deux types de résines :

- ❖ ***Les résines négatives*** : pour lesquelles le rayonnement ultraviolet entraîne une polymérisation des zones exposées, conférant ainsi à ces zones une tenue particulière au solvant de révélation alors que les parties non insolées disparaissent sélectivement dans ce solvant.
- ❖ ***Les résines positives*** pour lesquelles le rayonnement ultraviolet *UV* entraîne une rupture des macromolécules, d'où une solubilité accrue des zones exposées dans le révélateur.

L'opération de dépôt de la résine photosensible, opération appelée également laquage, s'effectue par centrifugation au moyen d'une tournette composée d'un système permettant la mise en rotation à grande vitesse de la plaque à résiner. Cette dernière est maintenue par aspiration à vide sur un

support solide du plateau en rotation. L'épaisseur finale de la couche de résine est principalement fonction de la quantité de résine déposée sur l'échantillon, de sa viscosité, et des conditions de rotation (accélération, vitesse, temps).

La résine photosensible, visqueuse après son étalement sur l'échantillon, est alors durcie sur une plaque chauffante ou dans un four, de façon à éliminer toutes les traces de solvant avant son insolation. Pour l'alignement et l'insolation de motifs d'un masque sur la plaque, on utilise un aligneur à UV permettant le masquage par contact [4]. Ce principe est illustré sur les figures suivantes.

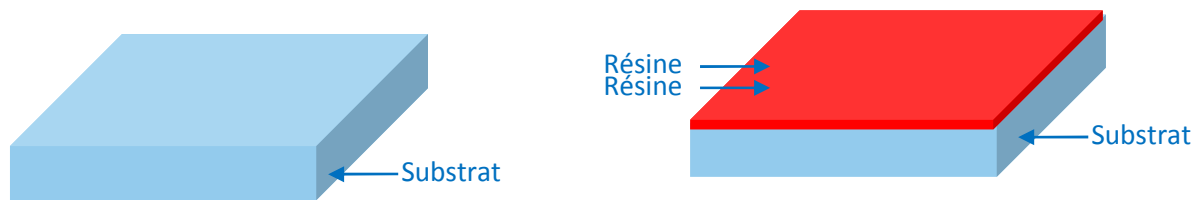


Figure II.2 : Le substrat (à gauche); Le substrat recouvert d'une couche de résine photosensible (à droite)

La première étape consiste à déposer une couche de résine photosensible sur le substrat à l'aide d'une tournette. Le substrat est ensuite chauffé afin de solidifier la résine.

L'étape suivante consiste à positionner le masque au moyen d'un aligneur. Cette étape est la plus délicate et ceci d'autant plus que le motif à reproduire est fin ou complexe, ou qu'il doit être superposé à d'autres motifs déjà présents sur le substrat.

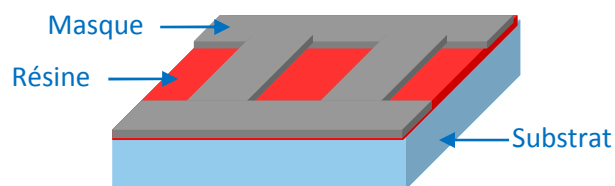


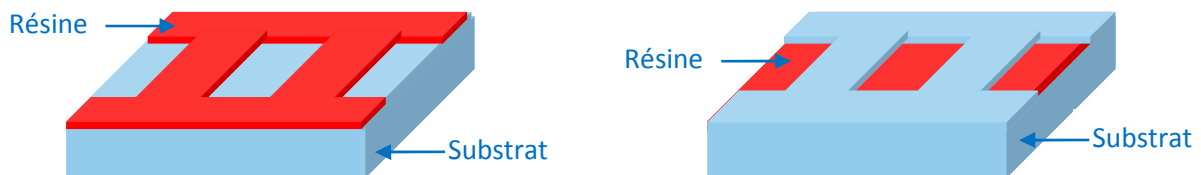
Figure II.3 : Le substrat recouvert d'une couche de résine photosensible et du masque

À l'alignement du masque succède l'étape d'insolation du substrat par un rayonnement ultraviolet (UV) qui modifie la solubilité de la résine. Les zones exposées de la résine deviennent ainsi plus ou moins solubles que les zones protégées par le masque, selon le type de résine.

Dans le cas des résines positives, la zone insolée devient plus soluble. Au contraire, dans le cas des résines négatives la zone insolée devient moins soluble. Les résines dites réversibles peuvent agir soit comme une résine positive, soit comme une résine négative.

Après l'insolation, il reste à révéler le motif en trempant le substrat dans un développeur. Ce dernier dissout la résine dans les zones où sa solubilité est la plus grande ce qui laisse le substrat nu.

Dans le cas des résines positives, c'est dans la zone insolée que la résine est dissoute, ce qui donne une image positive du masque. Au contraire, dans le cas des résines négatives c'est dans la zone protégée que la résine est dissoute, ce qui donne une image négative du masque.



*Figure II.4 : Le substrat après dissolution dans le cas d'une résine positive (à gauche);
Le substrat après dissolution dans le cas d'une résine négative (à droite) [5].*

Le substrat est alors prêt pour la phase suivante : dopage par implantation, métallisation, gravure....

❖ Dépôt des contacts

- Nettoyage de la surface en trois étapes (HF, H₂O₂+ H₂SO₄, HF).
- Dépôt des contacts avant sur l'émetteur par lithographie et évaporation du métal (lift-off).
- Après dépôt des contacts, nous enlevons la résine avec de l'acétone de qualité microélectronique.
- Recuit à 400°C sous H₂ pendant 5min.
- Nettoyage de la face arrière avec solution de HF/HNO₃ pour enlever toutes traces éventuelles de dopants n+ (nous protégeons la surface avant avec de la cire).
- Elimination de la cire avec deux bains de trichloréthylène bouillant.
- Dépôt du contact face arrière pleine plaque en aluminium par évaporation sous vide.

- Dépôt sur la face avant d'une couche de nitrure de silicium (SiN) par PECVD servant à la fois de couche antireflet et de couche de passivation. Ce dépôt s'effectue à 400°C et fait office de recuit pour les contacts. [8]

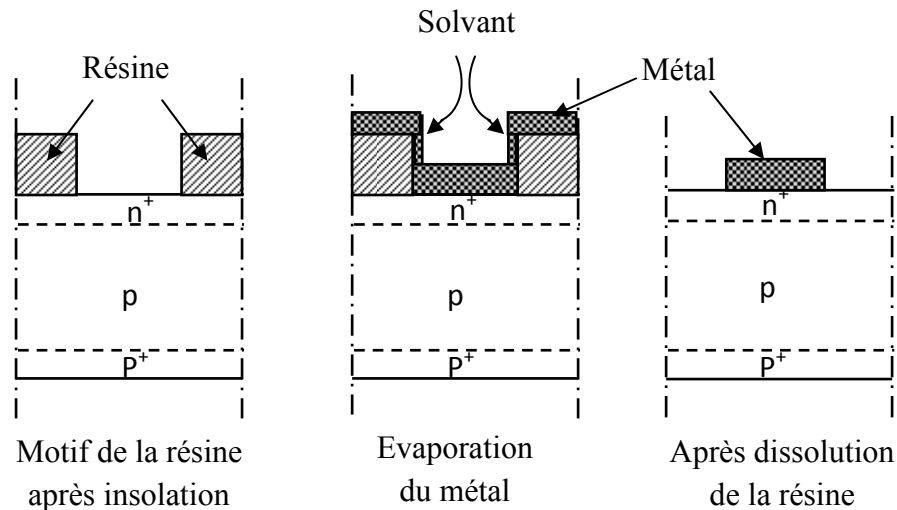


Figure II.5: Le principe de la technique de « lift-off » [9].

4. L'évaporation sous vide

“ Nous avons fait chauffer l'eau jusqu'à ébullition. Nous avons remarqué que de la vapeur d'eau s'échappait au-dessus de la casserole”.

Explication : L'eau s'évapore sous l'action de la chaleur : *L'évaporation*
“Ensuite, nous avons mis le plat en verre pendant 10 secondes. Le fond du plat s'est recouvert de buée”. La vapeur quand elle refroidit, se condense en fines gouttelettes d'eau : *La condensation.*

Même chose pour dépôt de films minces sauf qu'on veut évaporer Fe, Ag, Ni,.....!!!

Sur un substrat « froid » : verre, monocristaux... [3].

4.1. Définition

L'évaporation sous vide est une technique de dépôt de couche mince (généralement métallique), utilisé notamment dans la fabrication microélectronique. Le matériel à déposer est évaporé sous vide dans une enceinte hermétique, le vide permettant aux particules d'atteindre directement le support où elles se recondensent à l'état solide [6].

4.2. Principe

L'évaporation sous vide repose sur deux processus élémentaires : l'évaporation d'une source chauffée et la condensation à l'état solide de la matière évaporée sur le substrat. Cela ressemble quelque peu au procédé qui voit l'eau liquide apparaître sur le couvercle d'une casserole d'eau bouillante : l'eau liquide est évaporée et se recondense sur le couvercle qui est l'équivalent de la cible du dépôt.

L'évaporation a lieu sous vide, c'est-à-dire dans un environnement gazeux, vapeur de dépôt exclue, contenant extrêmement peu de particules. Dans ces conditions, les particules de matière peuvent se propager jusqu'à la cible sans collision avec d'autres particules. Par exemple dans un vide de 10^{-4} Pa, une particule de 0.4 nm de diamètre a un libre parcours moyen de 60 m, c'est-à-dire qu'elle peut parcourir en moyenne soixante mètres avant de rentrer en collision avec une autre particule. Les objets chauffés, i.e. le filament chauffant, produisent des vapeurs parasites qui limitent la qualité du vide dans la chambre de dépôt.

La collision de différents atomes durant l'évaporation peut provoquer des réactions susceptibles de modifier la nature du dépôt souhaité. Par exemple en présence d'oxygène, l'aluminium formera de l'oxyde d'aluminium. Ce phénomène peut aussi diminuer la quantité de vapeur déposée.

Le matériau évaporé ne se dépose pas de manière uniforme sur une surface irrégulière, comme l'est généralement celle d'un circuit intégré. Aussi, lors d'un dépôt sur une surface microstructurée complexe, il peut arriver des effets d'ombrage lorsqu'une surface du support est cachée du rayonnement unidirectionnel de la source [6].

La figure suivante représente un schéma du dispositif à évaporation sous vide

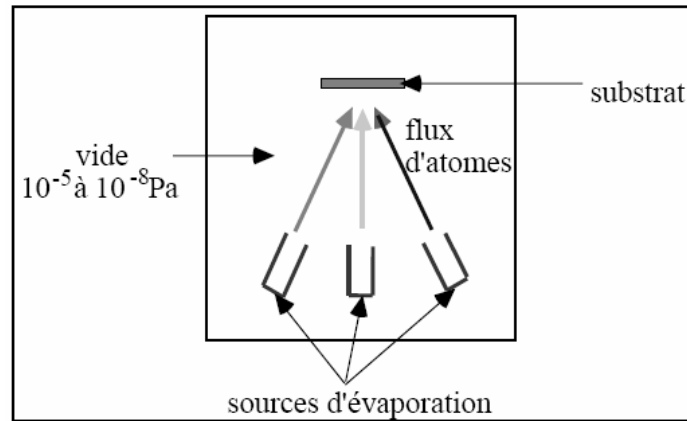


Figure II.6 : Schéma d'un dispositif à évaporation sous vide. [3]

4.3. Équipement

Tous les systèmes d'évaporation sont équipés d'une chambre dans laquelle sont placées la source et la cible du dépôt, d'une pompe pour faire le vide et d'une source d'énergie pour l'évaporation. Ils existent différentes sources d'énergie :

- Dans la méthode *thermique*, le matériel à déposer est placé dans un creuset qui est chauffé radialement par un filament électrique ; il est possible aussi que le filament lui-même soit la source.
- Dans la méthode par *faisceau d'électrons*, la source est chauffée par un faisceau d'électrons d'une énergie allant jusqu'à 15 keV.
- Par *évaporation flash*, la matière à déposer est sous forme d'un fil qui est continuellement dévidé et évaporé par contact avec une barre de céramique très chaude.

Dans certains systèmes, le support est monté sur un plateau qui tourne pendant le dépôt afin d'améliorer la régularité du dépôt et de limiter l'effet d'ombrage.

4.4. Principales utilisations

Les évaporateurs sont surtout utilisés pour :

- la métallisation (par exemple pour les cellules photovoltaïques et les détecteurs)
- le dépôt d'électrodes pour les matériaux à caractériser (DLTS, CV, ...)
- le dépôt de couches minces réfractaires, ... [5].

4.5. Avantages et inconvénients de l'évaporation sous vide

La méthode qui semble la plus adaptée au dépôt de petites molécules est celle du dépôt par évaporation sous vide. En effet, la centrifugation nécessite une certaine viscosité, difficile à obtenir avec des solutions à partir de petites molécules, alors que le dépôt par évaporation leur est totalement adapté. Les avantages de cette technique sont :

- La possibilité de bien contrôler l'épaisseur du film.
- L'obtention de films très purs.
- Par contrôle du taux de déposition et de la température du substrat, cette technique permet d'atteindre un ordre très important dans la couche réalisée.

En fait, c'est cette technique qui est utilisée dans l'élaboration des transistors qui ont conduit aux meilleures performances en terme de mobilité car elle permet d'obtenir de bons cristaux de pentacène. Toutefois, cette technique nécessite une mise au point compliquée et difficile pour obtenir de si bonnes performances. Elle requiert un équipement plus coûteux que celui utilisé pour le dépôt à la tournette. L'autre inconvénient du dépôt par évaporation sous vide est la limitation de la taille des surfaces couvertes [10].

5. Sérigraphie

Méthode d'impression dérivée du pochoir et qui consiste à faire passer les encres sur un support à travers un tissu qui est verni à certains endroits et perméable à d'autres. À l'origine connue sous le nom de trame de soie en raison de ses formes imprimantes fabriquées à base de soie, la sérigraphie est devenue un procédé de première importance dans la production de nombreux articles manufacturés, tels que les panneaux décoratifs, les circuits imprimés, les conteneurs en plastique et les vêtements à motifs.

Les pochoirs utilisés pour la sérigraphie commerciale sont généralement fabriqués à l'aide de procédés photomécaniques. Une fine trame de tissu synthétique ou de métal est tendue sur un cadre rectangulaire, puis une couche photopolymère est appliquée sur la totalité de la surface. L'exposition du photopolymère à travers un film positif provoque alors son durcissement dans les zones qui ne sont pas destinées à l'impression. La partie non exposée est

ensuite nettoyée pour créer les zones ouvertes du pochoir. Le cadre est alors pressé dans l'imprimante contre la surface à imprimer, et l'encre passe en force à travers les zones ouvertes du pochoir à l'aide d'une raclette en caoutchouc.

Les presses utilisées en sérigraphie vont du simple appareil manuel utilisé pour l'impression de petites surfaces aux presses pouvant accueillir de grandes feuilles pour des applications commerciales à grand tirage. Le procédé se distingue par sa capacité à imprimer des images détaillées sur pratiquement n'importe quelle surface, comme le papier, les plastiques, ou les métaux.

5.1. Principe de la technique

La méthode de dépôt par sérigraphie consiste en l'application d'une pâte sur un substrat, la cellule, au travers d'un masque. Cet écran sérigraphique, ou pochoir, est le négatif du motif à reproduire (Figure II.7a). Un traitement thermique à suivre va permettre la solidification de la pâte, sa densification et sa solidification à la cellule. C'est lors de cette étape que le contact, en face avant comme en face arrière, est réalisé par la diffusion des éléments métalliques de la pâte dans le semi-conducteur. Ces éléments métalliques constitutifs sont l'argent pour la pâte de la face avant (type n) et un mélange argent et aluminium pour la face arrière (type p)[12].

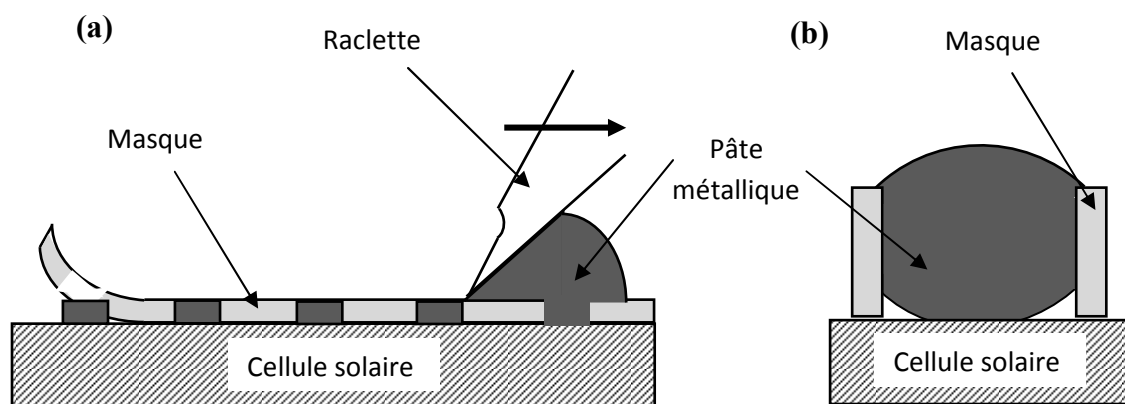


Figure II.7 : (a): Opération de sérigraphie des contacts, (b): Occupation du masque par la pâte.

Pour un gain de productivité, les contacts métalliques avant et arrière déposés subissent un traitement thermique commun. En conséquence, la manipulation des cellules sur la chaîne de production exige le déroulement des étapes préalables suivantes :

- Sérigraphie du schéma de la grille avant sur la couche antireflet.
- Séchage par étuve à air : 150°C pendant ¼ d'heure environ.
- Sérigraphie du schéma de grille arrière.
- Séchage par étuve à air- même température, même durée.
- Co-firing des pâtes dans un four à passage doté de lampes IR

Ce dernier traitement thermique a pour but la formation du contact ohmique. Lors de cette opération le contact va subir un frittage dont la conséquence est la diminution de sa résistance de couche. Dans le même temps, les particules métalliques devront diffuser en direction du silicium : en face avant pour le surdosage, en face arrière pour percer la jonction n^+p résultante de la diffusion du phosphore.

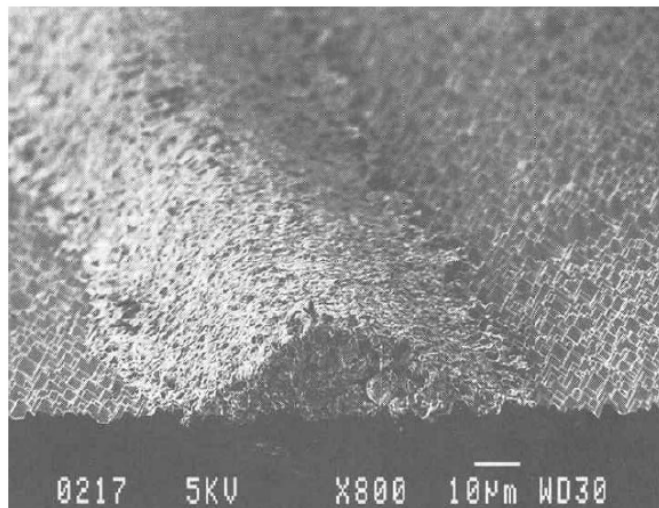


Figure II.8 : Doigt de contact par sérigraphie; les pyramides de texture sont également évidentes [11].

5.2. La technologie de sérigraphie

La sérigraphie est une technologie des films épais, la terminologie qui s'oppose à elle est la procédure microélectronique habituelle de l'évaporation des couches minces. La technique de la sérigraphie est plus fréquente car elle est plus facile à automatiser. Le tamis comporte une émulsion dans laquelle on constitue des ouvertures par photolithographie. Au cours de la sérigraphie, une pâte d'argent est pressée à l'aide d'une racle au travers de ces ouvertures et atteint ainsi

la cellule en cours de fabrication. La pâte doit ensuite être frittée. Pendant cette opération, le métal diffuse dans l'émetteur, ce qui assure un bon contact, mais impose que ce dernier soit suffisamment épais pour ne pas être percé, du moins à proximité des métallisations. Un autre inconvénient de cette technique est que la métallisation est poreuse, donc moins bonne conductrice du courant électrique qu'un métal pure.

Avec cette technique, on peut réaliser des largeurs de ligne de 50 à 100 microns. Le coefficient de remplissage atteint 78%.

Les écrans et les pâtes sont les éléments essentiels de cette technologie.

a) Écrans:

Les écrans sont les tissus serrés des fils d'acier inoxydable synthétique où étirés sur une armature en aluminium, comme est illustré sur la figure II.9. L'écran est couvert d'émulsion photosensible, qui est traitée avec des techniques photographiques de telle manière qu'elle soit enlevée des régions où l'impression est désirée.

Pour une bonne impression et des couches épaisses, comme le nécessite le contact avant d'une cellule solaire, les fils doivent être très minces et étroitement espacés. D'autre part, l'ouverture du réticule doit être plusieurs fois plus grande que la plus grande particule contenue dans la pâte à imprimer. Les écrans pour la production de cellule solaire comportent typiquement 325 fils par pouce, diamètre de fil autour 10 μm , l'ouverture de maille autour du 30 μm , correspondant à presque 50% d'ouverture de la surface, c.-à-d., non arrêtée par les fils et une épaisseur totale (fils tissés plus l'émulsion) de environ 100 μm . [11]

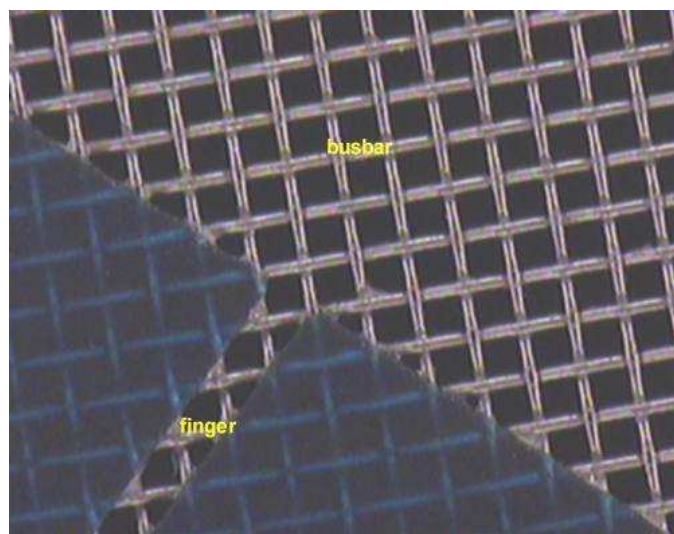


Figure II.9 : Un écran pour transférer le modèle de contact avant à une cellule solaire [15].

Figure II.10 : schéma du contact avant sur la cellule solaire (zones bleues représentent lenitrure de silicium et zones blanches réfléchissantes représentent l'argent) [15].

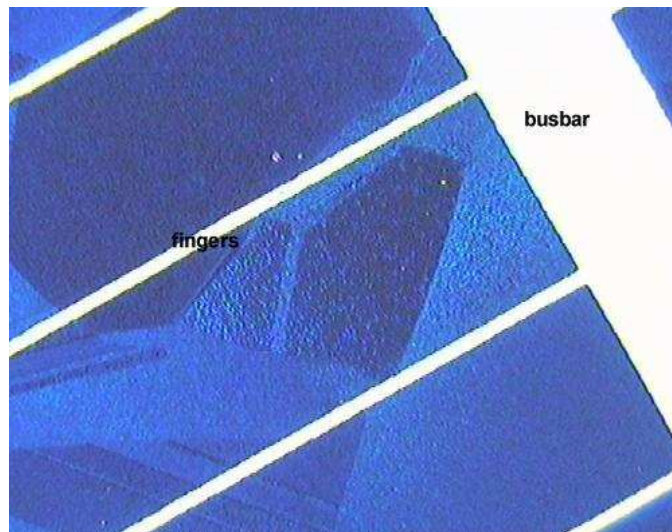
b) Pâte de sérigraphie

Les pâtes sont les transporteurs qui portent le métal actif sur la surface du substrat. Leur composition est formulée pour optimiser le comportement pendant l'impression. Une pâte pour les contacts métalliques de la cellule solaire se compose en général de ce qui suit:

- Une fritte de verre
- Le métal actif
- Les liants [12].

La fritte de verre, 5 à 10% du poids. Les oxydes comme le SiO_2 sont les éléments principaux de la fritte au verre. A ceux viennent s'ajouter Al_2O_3 (face arrière), B_2O_3 et ceux dits fondants ZnO (face avant) dans notre cas.

La matière de remplissage est constituée de grains très fin de métaux dont les dimensions peuvent aller jusqu'à $0.5\mu\text{m}$. Les métaux ici utilisés sont l'argent pour la pâte de type n de la face avant et l'argent plus l'aluminium en face arrière. C'est une poudre d'argent composée de cristallites d'une taille de



quelques dixièmes de microns. Pour le contact p, l'aluminium est également présent. Ceci s'élève de 60 à 80% du poids de la pâte.

Les liants sont des composés hydrocarbonés permettant la cohésion des éléments pulvérulents et d'assurer une viscosité adéquate de la pâte.

La composition de la pâte est extrêmement importante pour la réussite de la séquence technologique de la métallisation et elle est fortement liée au traitement thermique [12]. Une telle pâte doit présenter les propriétés suivantes afin de minimiser les pertes électriques et optiques :

- Faibles résistances de contact avec le silicium et interne de la pâte.
- Adhérence adéquate à la surface du silicium.
- Possibilité de pouvoir percer une couche antireflet et/ou de passivation pour obtenir un contact métal/semiconducteur.
- Qualité d'impression optimale avec un rapport hauteur /largeur élevé (faible changement de viscosité de la pâte à la traversée du maillage)
- Bonne soudabilité pour monter les cellules en module [13].

c) *Impression*

La figure illustre le processus d'imprimer une pâte par l'émulsion modelée sur un écran. L'écran et le substrat ne sont pas en contact, mais une distance les sépare appelé « snap-off ». Après avoir déposé la pâte, une pression est appliquée à la racle, qui peut être faite de métal ou de caoutchouc: ceci met l'écran en contact avec la plaquette. La racle est alors déplacée d'un côté de l'écran à l'opposé, traînant et serrant la pâte devant elle. Quand une ouverture est atteinte, la pâte la remplit et colle à la plaquette, et elle reste là après que la racle ait passé et l'écran s'est élastiquement retiré [11].

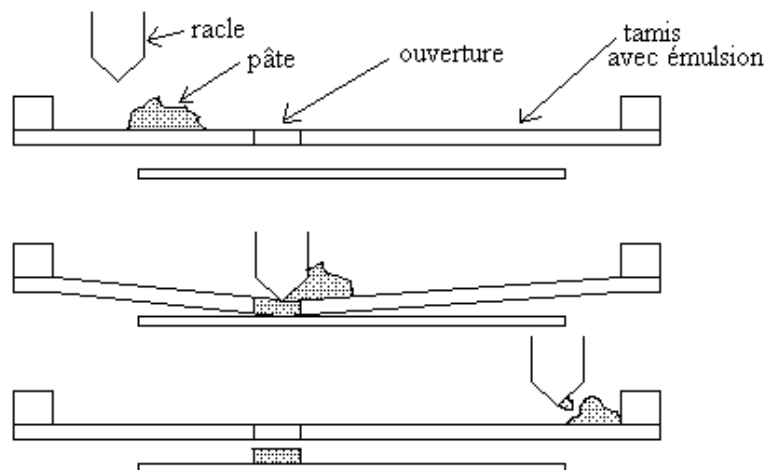


Figure II.11 : Illustrations des étapes d'impression (mouvement de la racle)

La quantité de pâte imprimée dépend de l'épaisseur de la matière d'écran et de l'émulsion et du terrain découvert du tissu. Elle dépend également de la largeur imprimée de ligne.

Les propriétés visqueuses sont de plus grande importance: en imprimant, la pâte doit être assez liquide pour remplir sans vide tout le volume laissé par le tissu et l'émulsion. Toutefois après son impression, elle ne doit pas s'étaler sur la surface « baver ». Les paramètres critiques de ce processus sont la pression appliquée sur l'écran, la distance écran cellule et la vitesse de la racle en outre de l'hygrométrie et la température ambiante.

d) Etuvage de la pâte :

Cette opération consiste à évaporer les solvants présents dans la pâte grâce à un chauffage modéré à une température de 200°C pendant une durée de (20-30 min). Elle doit être effectuée très rapidement pour éviter l'étalement de la pâte de sorte que la plaquette puisse être manœuvrée sans que le modèle imprimé soit endommagé. Malheureusement, ceci ne peut pas être évité car le chauffage brusque formerait une croûte sur la surface de celle-ci [11-13].

e) Déliantage de la pâte :

Dans cette étape, les composés organiques sont consommés à une température moyenne de 550°C, sous une atmosphère d'oxygène afin d'évacuer les différents éléments carbonés en formant des composés volatils COx.

f) Cuisson des contacts

La cuisson est une opération de frittage. La pâte se densifie, diffuse au travers de la couche antireflet en face avant (méthode du « fire-through »), et se solidarise à la cellule (effet de soldering). Cette phase est accomplie à une température élevée dépassant le seuil de 800°C et pendant une durée de 10-15 minutes, sous une atmosphère d'azote [13].

5.3. Qualités de la sérigraphie

Les moyens techniques que nécessite cette méthode sont peu importants par rapport à des contacts évaporés. Elle bénéficie en outre d'une rapidité d'exécution qui supporte la cadence de production industrielle élevée d'environ une cellule toute les deux secondes.

Les différents paramètres dont dépend la qualité de la sérigraphie sont résumés dans le tableau II.1 [12].

ELEMENTS	PARAMETRES
Raclette	Vitesse
	Pression
	Angle d'attaque
Encre	Viscosité (température de la pièce)
	Comportement thixotrope
Ecran de sérigraphie	Distance écran/cellule
	Hauteur de l'émulsion
	Ouverture des lignes

Tableau II.1 : Paramètres intervenants dans la sérigraphie.

5.4. Limitations et tendances dans la sérigraphie des contacts

En revanche cette technique affiche ses limites pour des motifs sérigraphiques trop fins. Dans la sérigraphie, le substrat est soumis à une pression considérable. Ceci peut poser un problème avec les plaquettes très minces ou irrégulières, qui peuvent être cassées. Des solutions alternatives à la métallisation ont été développées récemment et elles commencent à être employées dans l'industrie photovoltaïque [11].

Pour une viscosité importante, les effets de capillarité de la pâte sur les bords du pochoir deviennent non négligeables devant les dimensions. La pâte ne s'étale pas complètement au fond du masque (Figure II.7.b) malgré son caractère thixotrope et la distance entre le masque et la cellule. Nous rappelons que la thixotropie est le phénomène par lequel la viscosité de certaines substances varie avec la pression à laquelle elles sont soumises. Ces substances reprennent leur viscosité première une fois remises à la pression atmosphérique.

La largeur critique des lignes de collecte est d'une centaine de micromètres ; en deçà la résistivité de contacts s'en trouve accrue de manière considérable et les traitements thermiques provoquent leur sectionnement transverse. Ce problème revêt une importance toute particulière en face avant. Le rendement d'une cellule solaire étant fonction de sa surface éclairée, les contacts seront les plus fins possibles dans le but de diminuer le taux d'ombre (rapport de la surface éclairée par celle de la cellule). La valeur critique de largeur de lignes est 120 μ m [12].

En outre, les écrans deviennent déformés avec l'utilisation et une détérioration continue des modèles imprimés est observée. Les pochoirs en métal peuvent surpasser des écrans: ils produisent des lignes plus fines avec un

meilleur allongement, supportent plus d'opérations impression sans dégradation et ils ont besoin de moins de nettoyage et d'entretien [11].

6. Conclusion

Les configurations des grilles collectrices sont définies en tenant compte de plusieurs paramètres dont les principaux sont une occultation minimale de la surface active ($< 10\%$) et une faible résistance de contact pour limiter les pertes par effet joule, tout en diminuant la consommation de matière.

Son dépôt, éventuellement sur les deux faces, est effectué, entre autres, par évaporation thermique sous vide à travers un masque ou par photolithographie d'une couche métallique déposée par la même technique. Cette dernière est lourde et coûteuse en matériaux et en équipement. Par ailleurs, elle ne permet que le traitement d'un nombre limité de plaquettes par opération et donc mal adapté pour une production à grande échelle.

Ces handicaps ont orienté la recherche vers de nouveaux procédés dont le plus important est celui de la sérigraphie. Celui-ci, bien adapté pour une production en série à grande échelle. Il est aujourd'hui le plus utilisé pour la fabrication industrielle de photopiles au silicium cristallin à usage terrestre [2].

Références Bibliographiques

- [1] : **Oleksiy NICHIPORUK** « *Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités* ». Thèse de doctorat. INSA de Lyon. 2005.
- [2] : **A. Mouhoub**, Rev. Energ. Ren. Vol. 4 (2001) 11-22 / UDTS.
- [3] : **Stéphane ANDRIEU**, « *Introduction aux couches minces et aux réseaux* ». Ecole Franco-roumaine, CNRS université H. Poincaré, Nancy ; Roumanie 2003.
- [4] : **Pascal CHEVALIER**, l'Atelier de Recherches Pédagogiques de l'EUDIL
- [5] : Rapport interne de l'InESS – UMR7163 (CNRS Strasbourg – France)
- [6] : *Evaporation sous vide* / Wikipédia
- [7] : *Photolithographie* / Wikipédia

- [8] : **Fatima ABDO** « *Croissance de couches minces de silicium par épitaxie en phase liquide à basse température pour applications photovoltaïques* ». Thèse de doctorat. INSA de Lyon. 2007
- [9] : **Adolf GEOTZBERGER, Joachim Knobloch, Bernhard Voss.** « *Crystalline silicon solar cells* », pp157, WILEY; 1997
- [10] : **Jérôme BALLET**, *Contribution a la realisation de composants electroniques organiques a base de poly (3-octylthiophene)*, Thèse de doctorat, université de PAUL SABATIER; 2006.
- [11] : **Antonio Luque /Steven Hegedus** «*Handbook of photovoltaic science and engineering*» ; WILEY; 2003.
- [12] : **Bruno THUILLIER** « *Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisés à partir d'encre métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multicristallin* ». Thèse de doctorat. INSA de Lyon, 2001.
- [13] : **A.ZERGA**, Thèse de doctorat, université de Tlemcen; 2005.
- [14] : La filière photovoltaïque / CLEFS CEA - N°50/51 - HIVER 2004-2005
- [15] : **Christiana Honsberg and Stuart Bowden**, «Photovoltaics »CDROM. By National Science Foundation(NSF).

Chapitre III

Bilan des résistances dans une cellule photovoltaïque

1. Introduction

C'est en 1839 que le physicien français Edmond Becquerel découvre que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité quand ils étaient exposés à la lumière. Albert Einstein expliqua le phénomène photoélectrique en 1912 ; Mais ce n'est qu'en 1954 que la première cellule photovoltaïque a été mise au point par des chercheurs du laboratoire Bell aux USA. Cette première cellule PV était en silicium et avait un rendement de 6% [5].

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 à cause de la réflexion, soit à cause des contacts ohmiques et de la recombinaison. Cette structure a subi 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 cellule 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 [2].

2. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

Le développement, l'optimisation et la caractérisation de cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée : le soleil, la surface de celui-ci se comporte comme un corps noir à la température d'environ 5800 K. Ceci conduit à un pic d'émission situé à une longueur d'onde de 0.5 pour une puissance d'environ 60 MW/m², soit un total de $9,5 \cdot 10^{25}$ W.

Le rayonnement reçu par la Terre en incidence normale avoisine les 1400 W/m² avant d'aborder la couche atmosphérique. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre à cause des divers facteurs liés à la surface de la terre : absorption par les molécules des différentes couches de l'atmosphère, conditions climatiques, latitude du lieu d'observation et la saison. La couche d'ozone, par exemple, absorbe une partie du rayonnement sur une large bande de l'ultraviolet au visible, et l'oxygène

présente deux bandes étroites d'atténuation vers 690 et 760 nm. La vapeur d'eau enfin possède de nombreuses bandes d'absorption dans le visible et encore plus dans l'infrarouge. Le flux énergétique reçu au sol se réduit alors à 1000 W/m² avec un spectre décalé vers le rouge [10].

Afin de comparer et d'unifier les performances des cellules photovoltaïques élaborées dans les différents laboratoires du monde, il a été institué la notion d'Air Mass (AM). Elle quantifie la quantité de puissance absorbée par l'atmosphère en fonction de l'angle θ du soleil par rapport au zénith :

$$AM = \frac{1}{\cos(\theta)} \quad (III.1)$$

Si le soleil est au zénith du lieu d'observation, $\theta=0^\circ$, AM=1 : la notation utilisée est AM1. AM0 correspond à l'irradiance hors atmosphère, et elle est surtout utilisée pour prédire le comportement des cellules pour des applications spatiales. Le spectre standard le plus étudié est AM1.5G défini par l'angle 48.2°, au dessus de l'horizon, G signifiant global car il tient compte à la fois des radiations directes et diffuses, par opposition à AM1.5D qui ne tient compte que des directes. AM1.5G fournit une irradiance de 970 W/m², mais il a été arrondi à 1kW/m².

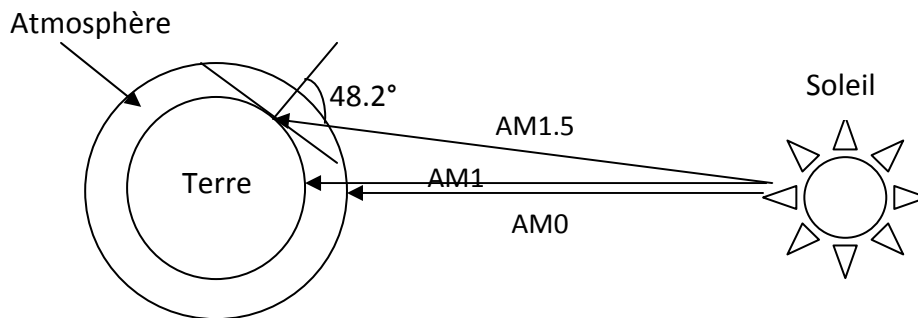


Figure III.1 : Définition de l'air de l'Air Masse [2].

L'intensité I_D reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule empirique suivante :

$$I_D = 1,353 \cdot (0,7^{AM})^{0,67} \quad (III.2)$$

Avec I_D en kW/m^2 , pour une surface perpendiculaire aux rayons incidents. Les spectres AM0 et AM1.5 sont représentés sur la figure III.2.

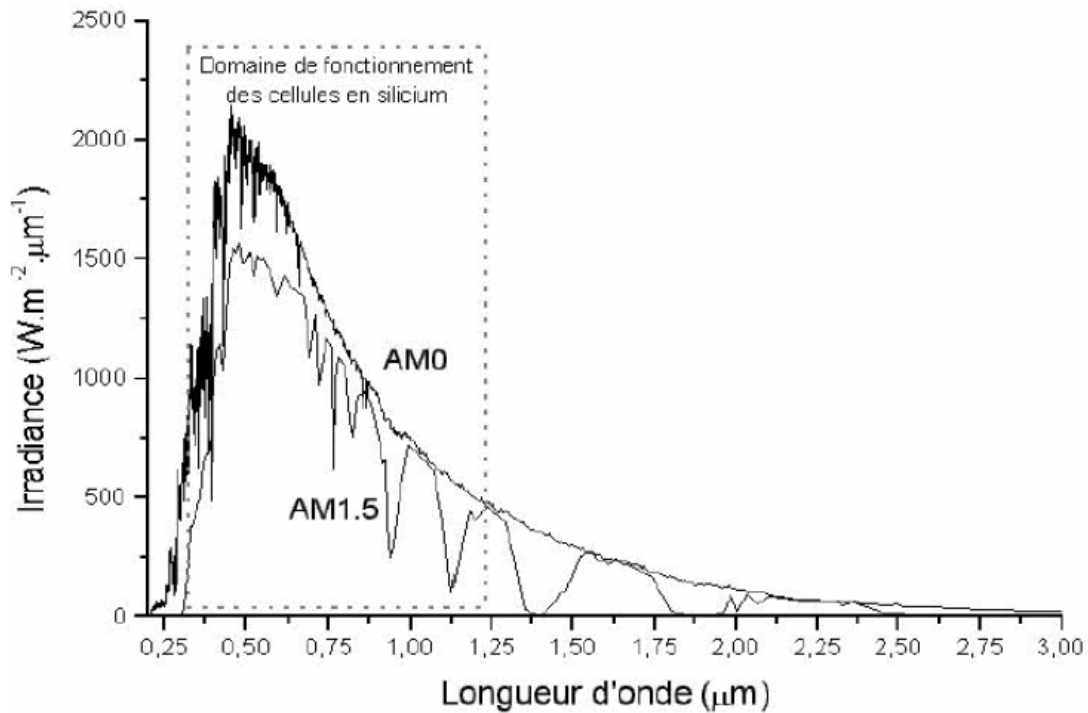


Figure III.2: Représentation graphique des spectres AM0 et AM1.5 d'après. Le domaine spectral utile aux cellules en silicium est mis en évidence.

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

3. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque repose principalement sur trois grands principes dont l'action conjuguée de manière quasi-simultanée engendre la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique :

- L'absorption de photons
- La conversion de l'énergie absorbée en charges électriques libres
- La collecte de ces particules dans un circuit électrique extérieur

Un dispositif photovoltaïque doit donc être constitué :

- D'un matériau absorbant dans la gamme du spectre solaire et possédant au moins une transition possible entre deux niveaux d'énergie ;
- Et d'une structure de collecte, de résistance électrique la plus faible possible.

L'optimisation de ce dispositif passe par une gamme de fréquence absorbante la plus large possible, couvrant la partie la plus dense du spectre solaire ; ainsi qu'une différence d'énergie entre deux niveaux de transition la plus petite qu'elle soit. Leur structure de bande (interdite et de conduction) fait des semiconducteurs le meilleur compromis pour la réalisation des cellules solaires. On en trouve actuellement en arséniure de gallium pour les applications spatiales, en silicium cristallin pour les applications terrestres et en silicium amorphe pour des cellules bas coût [4].

Une cellule solaire se compose d'un certain nombre de couches, généralement deux couches principales, l'une est constitué d'un semiconducteur 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 semiconducteurs 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 semiconducteur et contribuent au courant.
- Lorsque les deux semiconducteurs constituent une jonction, un champ électrique s'établit [2].

Les photons incidents créent des porteurs dans les zones n et p et dans la zone de charge d'espace. Les photoporteurs auront un comportement différent selon la région :

- Dans la zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont "envoyés" par le champ électrique dans la zone p (pour les trous) ou dans la zone n (pour les électrons) où ils sont majoritaires. On aura un photocourant de diffusion ;
- Dans la zone de charge d'espace, les paires électron/trou créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique : les électrons vont aller vers la région n, les trous vers la région p. On aura un photocourant de génération.

Ces deux contributions s'ajoutent pour donner un photocourant résultant I_{ph} . C'est un courant de porteurs minoritaires. Il est proportionnel à l'intensité lumineuse [7].

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$I = I_{obs} - I_{ph} \quad (III.3)$$

Avec

$$I_{obs} = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad (III.4)$$

Où q : charge élémentaire ($q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C)

V : tension aux bornes de la jonction.

k : constante de Boltzmann ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J.K⁻¹)

T : température (K)

I_0 est le courant de saturation en inverse de la diode. Le coefficient n est le facteur d'idéalité de la diode et il dépend de la qualité de la jonction (égal à 1 si la diode est idéale et égal à 2 si la diode est entièrement gouvernée par la génération/recombinaison avec des pièges situés au milieu de la bande interdite).

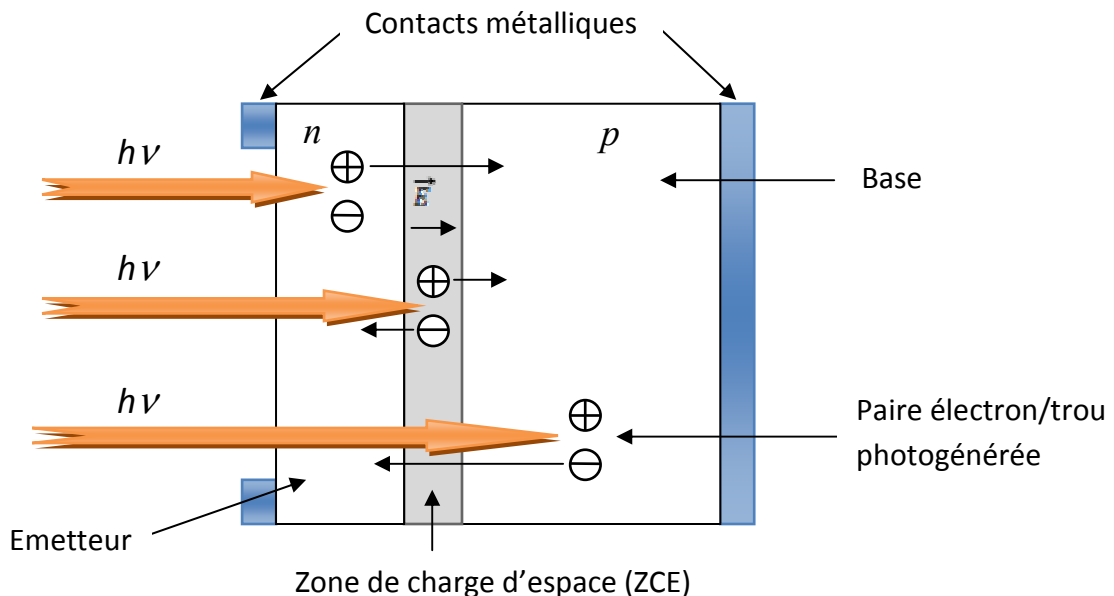


Figure III.3 : Schéma de la structure d'une cellule photovoltaïque en silicium et illustration des phénomènes de photogénération et de collecte de porteurs pour différentes longueurs d'onde.

La longueur de diffusion des électrons photogénérés est plus grande que celle des trous. La base présente une épaisseur relativement grande ($\sim 250\text{-}300\ \mu\text{m}$) et elle est le plus souvent de type p : elle va fournir le plus de porteurs. Afin de limiter les recombinaisons avec les porteurs majoritaires, elle est faiblement dopée (environ $10^{16}\ \text{cm}^{-3}$). L'émetteur, de type n, est de faible épaisseur ($\sim 0.5\ \mu\text{m}$) et fortement dopé ($>10^{20}\ \text{cm}^{-3}$) afin d'obtenir un champ électrique suffisant dans la ZCE ($\sim 0.3\ \mu\text{m}$). L'épaisseur de la cellule doit être choisie de manière à ce qu'un maximum de photons soit absorbé par le silicium, tout en tenant compte des contraintes de découpe du matériau [3].

4. Schéma électrique équivalent

L'équation (III.3) correspond à un cas idéal du fonctionnement de la cellule photovoltaïque. Pour tenir compte des limitations de la cellule et calculer le courant réellement délivré à la charge du circuit extérieur, on introduit un modèle comportant une résistance série et une résistance parallèle. Ce modèle est représenté par le schéma électrique suivant (Figure III.4)

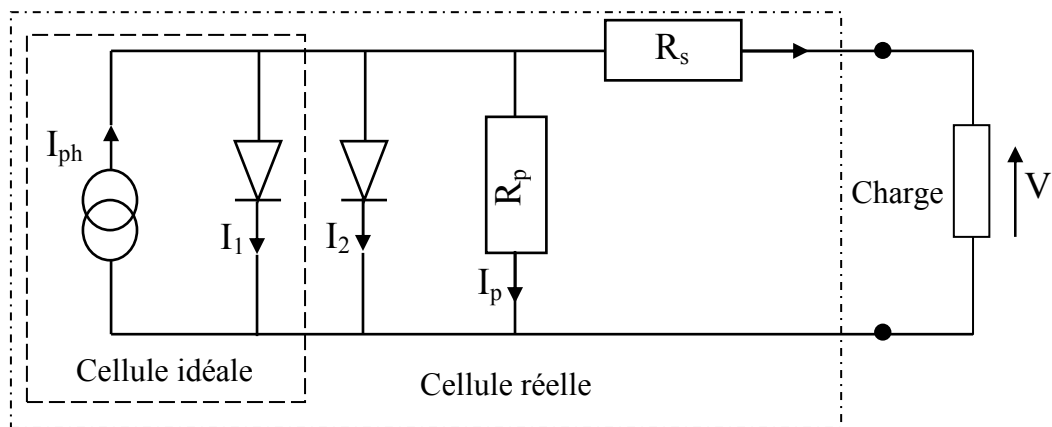


Figure III.4 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle. [11].

L'équation du courant devient :

$$I = I_1 + I_2 + I_p - I_{ph}$$

$$I = I_{01} \left(\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{n_1 kT} \right) - 1 \right) + I_{02} \left(\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{n_2 kT} \right) - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_p} - I_{ph} \quad (III.5)$$

Le schéma électrique équivalent d'une cellule solaire est ainsi composé d'une source de courant et de deux diodes en parallèle. La source de courant modélise le courant photogénéré I_{ph} . La première diode (facteur d'idéalité $n_1 \approx 1$) correspond au courant de diffusion dans la base et l'émetteur. I_{01} est le courant

de saturation de ce phénomène. I_2 est le courant de génération/recombinaison ou d'effet tunnel dans la zone de charge d'espace, avec I_{02} le courant de saturation et n_2 le facteur d'idéalité de la seconde diode ($n_2 \approx 2$)[3].

Afin de modéliser les courants de fuite existant dans la structure, la résistance parallèle R_p est ajoutée. Ces courants de fuite peuvent avoir lieu par exemple lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur. Elle peut aussi être due à un court-circuit sur les bords de la cellule. Cette valeur doit être la plus élevée possible.

La résistance série R_s modélise la résistance interne de la cellule. Elle est due à la résistivité des différentes couches de la cellule : émetteur, base et contacts métalliques (en particulier aux interfaces métal/semiconducteur). Afin de limiter son influence sur le courant de la cellule, R_s doit être minimisée en optimisant les contacts métal/semiconducteur et en diminuant la résistivité du matériau. Un compromis est à trouver entre cette dernière et la recombinaison des porteurs : un dopage trop élevé entraîne des recombinaisons trop importantes [7].

5. L'influence des résistances ohmiques

L'influence des résistances ohmiques sur la caractéristique de la cellule solaire est montrée sur les figures III.5 et III.6. La résistance parallèle ou de shunt, R_p , n'a aucun effet sur le courant de court circuit, mais elle réduit la tension en circuit ouvert. Réciproquement, la résistance série, R_s , n'a aucun effet sur la tension de circuit ouvert, mais elle réduit le courant de court-circuit.

La figure III.5 montre l'influence de la résistance de shunt. Avec une valeur de la résistance décroissante, le facteur de forme FF et la tension en circuit ouvert diminuent. Par ailleurs, le courant de court circuit n'est pas influencé par la résistance parallèle. Comme la résistance de shunt en cellules monocristallines est plus grande que $1000 \Omega\text{cm}^2$, nous devons à peine considérer son influence.

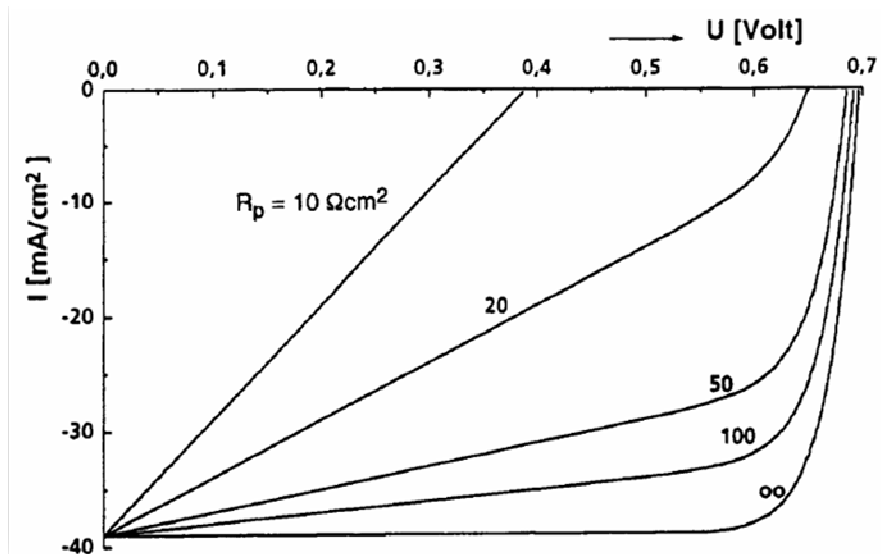


Figure III.5 : L'influence de la résistance de shunt sur la caractéristique d'une cellule solaire.

La figure III.6, montre l'influence de la résistance série. Là aussi c'est principalement le facteur de forme qui est influencé en augmentant la résistance. Pour obtenir le rendement le plus élevé possible, il est nécessaire que la résistance série soit gardée aussi basse que possible ($\leq 0,5 \Omega\text{cm}^2$) [1].

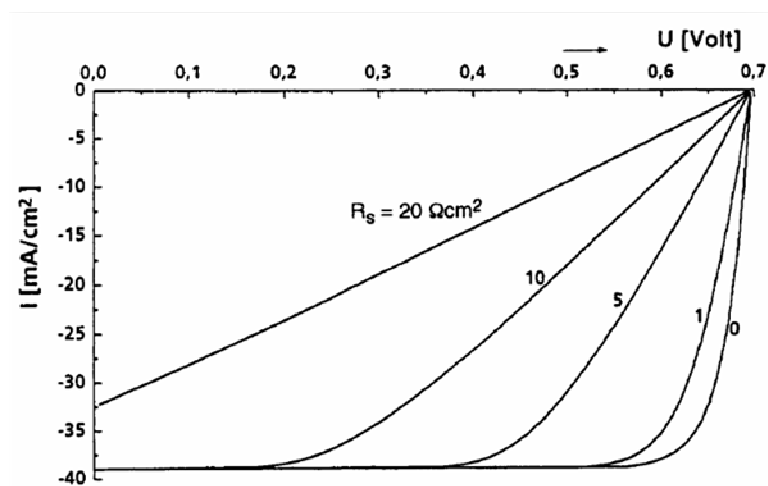


Figure III.6: L'influence de la résistance série sur la caractéristique d'une cellule solaire.

6. Caractéristiques électrique et paramètres de la cellule photovoltaïque

Afin d'obtenir un générateur électrique autonome, il faut que la diode soit polarisée en direct, selon l'équation (III.5). L'effet photovoltaïque est à la fois

une création d'un photocourant mais aussi d'une tension qui auto-polarise la diode en direct : on a une génération d'une puissance électrique.

En effet, en circuit ouvert, la photogénération de porteurs entraîne une augmentation du nombre d'électrons du côté n de la jonction et de trous du côté p. La séparation de ces charges induit un champ électrique opposé à celui déjà existant à la jonction. Un nouvel équilibre est obtenu pour lequel une tension existe entre les terminaux du circuit extérieur. C'est la tension de circuit ouvert V_{oc} , pour laquelle le courant photogénéré et le courant d'obscurité se compensent exactement ($I = 0$). C'est la tension maximale fournie par la cellule solaire, permettant d'évaluer le nombre de recombinaisons dans la structure (plus V_{oc} est faible, plus il y a de recombinaisons).

Un autre paramètre important de la cellule est le courant de court-circuit I_{cc} . C'est le courant maximum que l'on peut extraire de la structure et il correspond idéalement au courant photogénéré. Ce courant dépend fortement du taux de génération optique G et de la longueur de diffusion L_D des porteurs (et donc des recombinaisons).

La caractéristique $I(V)$ d'une cellule solaire est la superposition d'un courant de diode sous obscurité et d'un courant photogénéré (voir Figure III.7.a). L'éclairement de la structure a pour effet de déplacer la courbe $I(V)$ de la diode vers les courants inverses. Puisque la photodiode est considérée comme un générateur, la convention est d'inverser l'axe des courants, comme illustré par la Figure III.7.b. Notons que la cellule photovoltaïque n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I(V)$ est fixée. C'est la valeur de l'impédance de la charge aux bornes de la cellule qui va imposer le point de fonctionnement. Il est donc essentiel de choisir une charge telle que la puissance délivrée soit maximale.

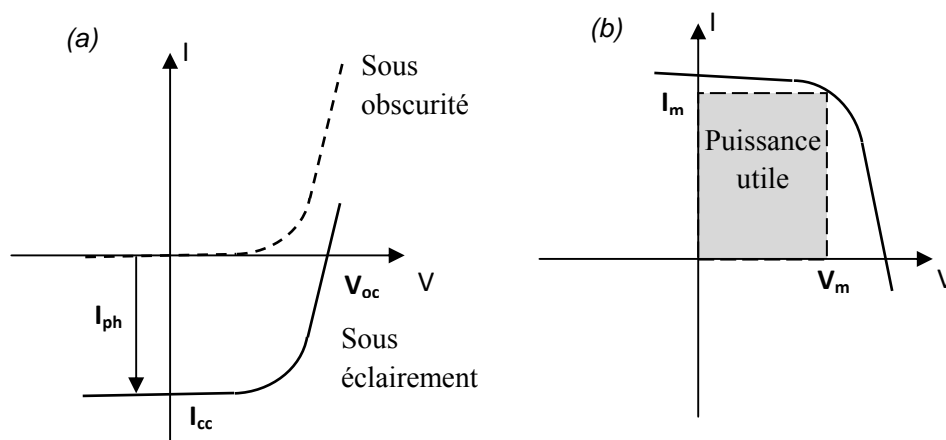


Figure III.7 : (a) caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque sous éclairement et sous obscurité et (b) représentation conventionnelle de la courbe $I(V)$.

Le maximum de puissance disponible est défini par la tension V_m et le courant I_m . La qualité électrique de la cellule est déterminée par le facteur de forme FF , donné par l'équation suivante :

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{cc} V_{oc}} \quad (III.6)$$

Le point de fonctionnement de la cellule sur la courbe I(V) est déterminé par l'impédance de la charge, qui, mal adaptée, n'utilisera pas toute la puissance disponible. Il est donc important de pouvoir travailler avec les valeurs V_m et I_m afin d'utiliser la puissance maximale.

Le rendement η est un autre paramètre important pour comparer les performances des photopiles. Il est défini par le rapport de la puissance fournie sur la puissance incidente P_{in} :

$$\eta = \frac{V_m I_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot V_{oc} I_{cc}}{P_{in}} \quad (III.7)$$

Pour comparer de manière objective le rendement des cellules solaires, la puissance incidente doit être prise comme identique, par convention sous AM1.5 et à 25°C.

Enfin, afin de comparer la production photovoltaïque avec les autres sources d'énergie, la littérature utilise souvent l'unité Watt crête (W_c ou W_p en anglais peak Watt. Elle correspond à la puissance nominale d'une cellule ou d'un module photovoltaïque dans des conditions d'ensoleillement standard (AM1.5) [3].

7. Pertes physiques et technologiques

Depuis les années 80, la majorité des recherches du secteur photovoltaïque se sont concentrés à mener le niveau du rendement aussi élevé que possible en se basant sur une réduction importante des différentes pertes. Les considérations et les calculs suivants sont basés exclusivement sur les cellules solaires faites à partir du silicium cristallin. La Figure III.8 donne une vue d'ensemble et une classification des différents mécanismes des pertes. Ceux-ci peuvent être divisés principalement en deux secteurs [1].

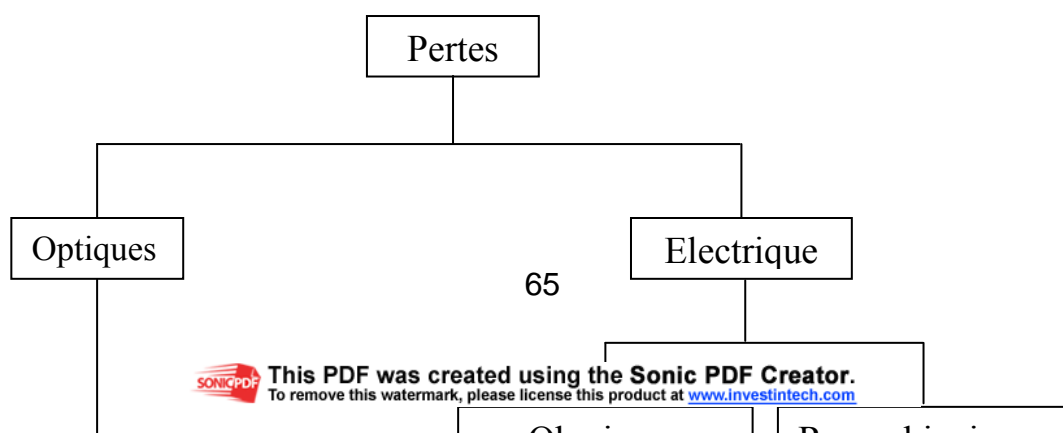


Figure III.8 : Mécanismes de perte dans une cellule solaire.

Les pertes optiques affectent le rayonnement solaire incident par réflexion et par ombrage de la lumière aussi bien que par une absorption insatisfaisante des longueurs d'onde. Par contre, les pertes électriques ont un effet néfaste sur le courant et, surtout, la tension d'une cellule solaire [1].

Le rendement de conversion photovoltaïque peut être exprimé en prenant en compte les facteurs de pertes :

$$\eta = \frac{\int_0^{\lambda_g} P(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} P(\lambda) d\lambda} \times \frac{E_g \int_0^{\lambda_g} N(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\lambda_g} P(\lambda) d\lambda} \times \frac{qV_{oc}}{E_g} \times FF \times (1 - R) \times \frac{S - S_{\text{métal}}}{S} \times \eta_{\alpha} \times \eta_{col} \quad (III.8)$$

Facteurs : ① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧

Les différents facteurs de pertes (1 à 8) sont dus soit aux restrictions purement physiques liées au matériau, soit aux limitations technologiques induites par le processus de fabrication. Des choix technologiques appropriés peuvent cependant avoir des conséquences sur les limitations intrinsèques du matériau.

a) Pertes physiques

① Pertes par les photons de grande longueur d'onde: tous les photons possédant une longueur d'onde supérieure à celle associée au gap du semiconducteur ($\lambda > \lambda_g$) ne peuvent générer de paire électron/trou et ils sont

donc perdus. Les mécanismes d'absorption assistée par photons permettent néanmoins de repousser la limite inférieure de l'énergie correspondant au gap du matériau (1.052 eV au lieu de 1.124 eV dans le cas d'une absorption assistée par un phonon dans le silicium). Sous un éclairage normal AM1.5, ces pertes sont évaluées à 23.5% dans le cas du silicium.

② Pertes dues l'énergie excédentaire des photons : un photon absorbé génère seulement une paire électron/trou. L'excès d'énergie, supérieur à la largeur de la bande interdite, est principalement dissipé sous forme de chaleur. Sous un éclairage normal AM1.5, ces pertes sont évaluées à 33% de la puissance totale dans le cas du silicium.

③ Facteur de tension : c'est le rapport de la tension maximale développée par la cellule (V_{oc}) par la tension de gap E_g/q . La tension aux bornes d'une cellule n'est qu'une fraction de la tension de gap à cause notamment de la chute de potentiel au niveau des contacts et de la jonction. Les meilleures valeurs obtenues de V_{oc} sont de l'ordre de 720mV, donnant, pour ces cellules à haut rendement, un facteur de tension de seulement 0.65.

④ Facteur de forme FF : les équations courant-tension sont régies par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle $\left(\exp\left[\frac{qV}{kT}\right]\right)$. La courbe $I(V)$ ne peut donc avoir une forme rectangulaire et, même dans le cas d'une cellule idéale, le facteur de forme ne peut dépasser 0.84. Ce terme dépend fortement des paramètres technologiques modélisés par les résistances série et parallèle.

b) Pertes technologiques

⑤ Réfectivité : une partie de l'énergie incidente est réfléchiée par la surface (non métallique) de la cellule. Le coefficient de réflexion R peut être optimisé par la mise en œuvre de traitements de surface adéquats et de couche antireflet.

⑥ Taux d'ombrage : les contacts métalliques (de surface S_{metal}) présents sur la face avant afin de collecter les porteurs entraînent des pertes de puissance puisqu'ils couvrent en partie la surface S de la cellule. Le taux d'ombrage est un compromis entre les pertes dues à la couverture partielle de l'émetteur par les contacts et les pertes de facteur de forme provoquées par la résistance série, liée à la largeur des doigts et du busbar de la métallisation.

⑦ Rendement d'absorption : à cause de l'épaisseur limitée de la cellule, une part non négligeable de photons, ayant néanmoins l'énergie requise, traverse

l'épaisseur de la structure sans être absorbés. Des techniques de piégeage par réflexion sur la face arrière peuvent augmenter de manière significative l'absorption, particulièrement dans le cas des cellules très fines.

⑧ Rendement de collecte: c'est le rapport entre le nombre de porteurs effectivement collectés et le nombre total de porteurs photogénérés. En effet, certains porteurs se recombinaient dans le volume ou à la surface de la cellule. Ce phénomène dépend directement de la durée de vie τ des porteurs minoritaires. Ces recombinaisons peuvent être réduites en mettant en œuvre différents traitements tels que la passivation, le gettering et autres.

Ces différents facteurs peuvent être optimisés à l'aide de procédés technologiques utilisés lors de la fabrication des cellules photovoltaïques [3].

8. Les technologies photovoltaïques

Aujourd'hui, le matériau silicium occupe une place prédominante au sein de l'industrie photovoltaïque grâce à ses nombreux avantages : disponible et facilement extrait à partir du sable. Il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés isolantes et passivantes. Il peut se doper facilement (avec le phosphore ou le bore) et ses qualités photovoltaïques assurent un bon rendement de conversion ainsi qu'une versatilité des formes employées : silicium monocristallin, multicristallin, polycristallin ou amorphe. La différence entre ces matériaux réside dans leur régularité cristallographique : si le silicium monocristallin comporte des tailles de grains parfaitement ordonnés supérieures à 10 μm , elles sont comprises entre 1 μm et 10 μm pour le silicium multicristallin et entre 1 μm et 1 μm pour le silicium polycristallin. Le silicium amorphe est quant à lui complètement désordonné.

Son seul véritable inconvénient est son gap indirect à 1,12 eV. Ceci entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à gap direct. De plus, la largeur de bande interdite du silicium fait qu'il n'est pas le mieux adapté pour capter la part optimale du spectre solaire [5-6].

8.1. Le silicium multicristallin

Le silicium monocristallin comporte peu de défauts recombinants et permet d'obtenir les meilleurs rendements. Cependant, son élaboration est très coûteuse, ce qui constitue un frein à son développement industriel pour les applications photovoltaïques. Les techniques de production du silicium multicristallin sont beaucoup plus simples et donc bien moins chères à mettre en œuvre. Néanmoins, la qualité de ce matériau est moins bonne à cause de la présence de joints de grains qui introduisent des zones fortement recombinantes et un taux assez élevé des impuretés métalliques et autres.

Ces joints sont constitués par les surfaces adjacentes de grains d'orientations cristallographiques différentes (Figure III.9) et contiennent beaucoup de liaisons pendantes. Ils ont pour effet de réduire la durée de vie globale des porteurs. En outre, ces joints de grains bloquent le flux de porteurs et ils constituent une voie éventuelle d'un courant de fuite à travers la jonction.

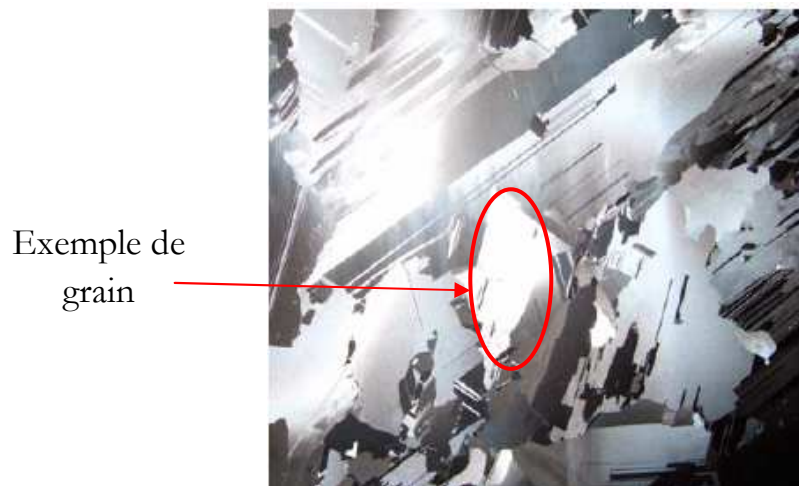


Figure III.9: Photo d'un substrat de silicium multicristallin (échelle : $10 \times 10 \text{ cm}^2$).

On peut différencier deux types de défauts dans le silicium multicristallin : les défauts intra-granulaires, similaires à ceux rencontrés dans le silicium monocristallin, et les défauts inter-granulaires.

- **Défauts intra-granulaires**

Elles sont généralement dues aux impuretés, telles que le carbone ou l'oxygène, introduites essentiellement pendant la croissance du lingot. Leur influence sur les propriétés électroniques du silicium est cependant faible, bien qu'elles existent en concentration élevée. Elles peuvent toutefois devenir électroniquement actives en s'associant avec d'autres défauts. Si ces impuretés

sont des métaux de transition, des niveaux d'énergie profonds sont introduits dans la bande interdite du semiconducteur, constituant des centres recombinants.

- **Défaut inter-granulaires**

Ces défauts correspondent aux joints de grains et ils sont une source importante de recombinaisons dans le volume du matériau. Leur quantité dépend de la taille des grains, qui peut varier d'une méthode de production à une autre et qui est fonction de leur localisation au sein d'un même lingot : les grains périphériques sont en général plus petits que ceux situés au centre car ils sont soumis à plus de contraintes thermiques [3].

8.2. **Méthode standard de fabrication d'une cellule photovoltaïque en silicium multicristallin**

Nous allons présenter le processus standard de fabrication des cellules photovoltaïques en silicium multicristallin, qui est un compromis entre le coût de production et le rendement. Les différentes étapes sont résumées sur la Figure III.10.

- Découpe

Parmi les différents procédés de production du silicium multicristallin, nous prenons l'exemple du POLIX, permettant d'obtenir une cristallisation directionnelle. Le silicium se présente sous la forme de gros grains, allongés transversalement à la cellule. Cela accorde aux porteurs minoritaires une longueur de diffusion élevée. Ces lingots sont ensuite découpés en briques grâce à une scie à ruban, qui sont elles-mêmes sciées en plaques minces à l'aide d'une scie à fil.

- Traitement de surface et texturisation

L'étape de sciage entraîne des dommages en profondeur à la surface des wafers, de l'ordre du rayon du fil de la scie. Un fort décapage à la soude retire la zone perturbée. Puis l'étape de texturisation est entreprise sur les faces avant et arrière à l'aide d'une solution acide ou basique, pour la formation des pyramides qui constituent des pièges pour le rayonnement incident augmentant ainsi l'absorption.

- Formation de la jonction n

Dans l'étape suivante, le substrat est placé dans un four de diffusion à environ 850°C pendant 20 minutes dans un mélange gazeux de N₂, O₂ et de POCl₃. Un verre de phosphore (P₂O₅) se forme sur tout le pourtour de la plaque, à partir duquel le phosphore va diffuser sur une profondeur moyenne de 0.5 μm. On obtient donc une structure n⁺/p/n⁺. On procède ensuite à la désoxydation, c'est-à-dire l'élimination du verre conducteur, par acide fluorhydrique (HF à 10%). Les substrats sont ensuite rincés à l'eau désionisée.

- Ouverture de la jonction

Les plaquettes sont superposées les unes sur les autres (~ 400 à la fois) et gravées latéralement par plasma. L'émetteur n'est ainsi plus en contact avec la face arrière de la cellule.

- Couche antireflet et passivation de la face avant

Le nitrure de silicium hydrogéné (SiN_x:H) est ensuite déposé par PECVD afin de faire office de couche antireflet et de passivation. On peut noter également que la couche de SiN joue le rôle de barrière de diffusion contre les impuretés, réduisant le risque d'introduction, pendant les étapes ultérieures, d'impuretés métalliques pouvant court-circuiter la jonction. De plus, les contacts métalliques lors de leur recuit pénètrent moins profondément dans l'émetteur. La technique PECVD permet d'obtenir des vitesses de dépôt relativement élevées à basse température (< 400°C).

- Métallisation avant

Les contacts avant sont déposés par sérigraphie avec une pâte à l'argent au travers d'une grille. Puis, ils sont séchés dans une étuve à air à 150°C pendant un quart d'heure.

- Métallisation arrière

Une pâte en aluminium est ensuite déposée sur la quasi-totalité de la face arrière. De même, le métal est séché dans une étuve à air à 150°C pendant un quart d'heure.

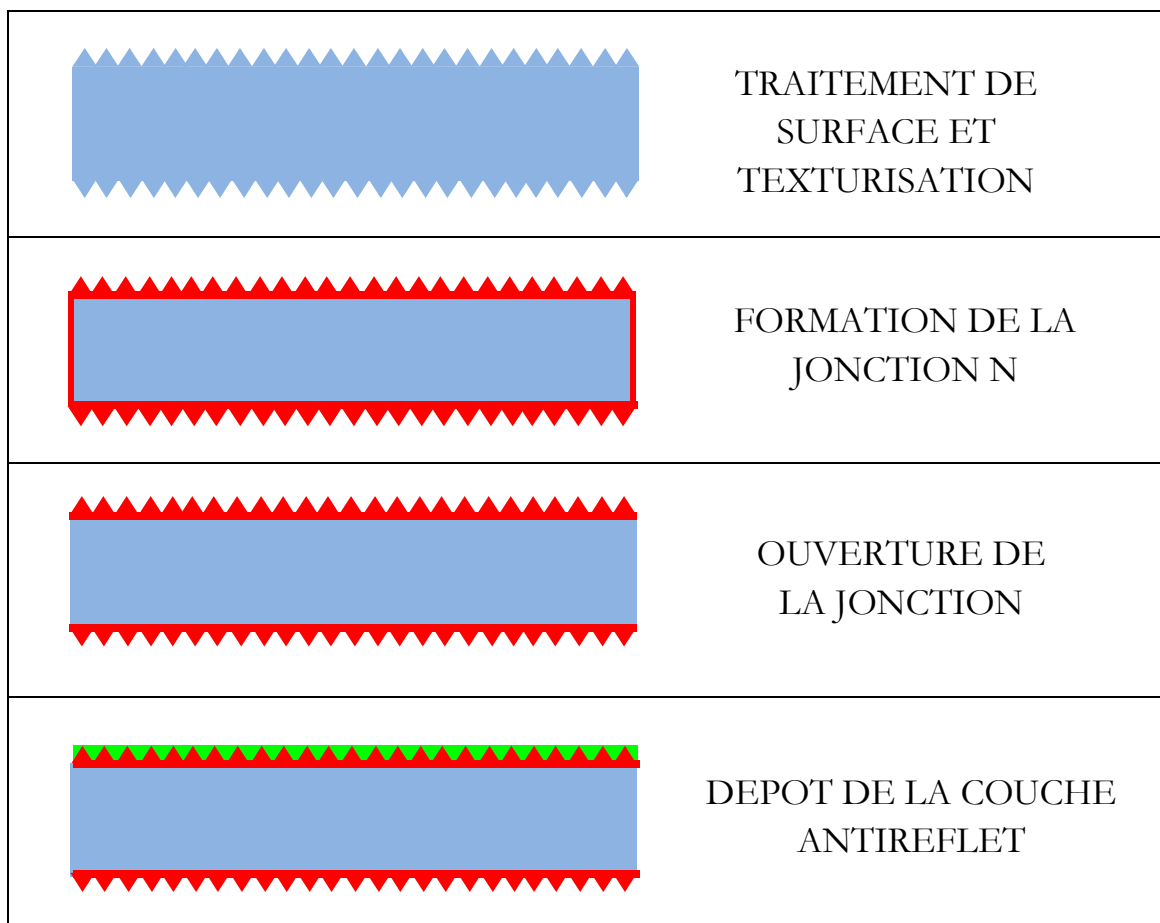
- Co-firing : *formation des contacts, passivation du volume et de la face arrière*

La cuisson simultanée des contacts « co-firing » permet de combiner la formation des contacts avant (à travers le SiN) et arrière (BSF), ainsi que les effets getter (Al) et passivation par hydrogénation ($\text{SiN}_x\text{:H}$). Elle se fait par cuisson rapide sous air à environ 800°C pendant quelques secondes.

- Soudures et test des cellules

Les rubans de connexion sont ensuite soudés à température ambiante sur les faces avant et arrière. Finalement, les cellules sont testées et classifiées selon les résultats.

Ces différentes étapes de fabrication sont illustrées sur la figure III.10.



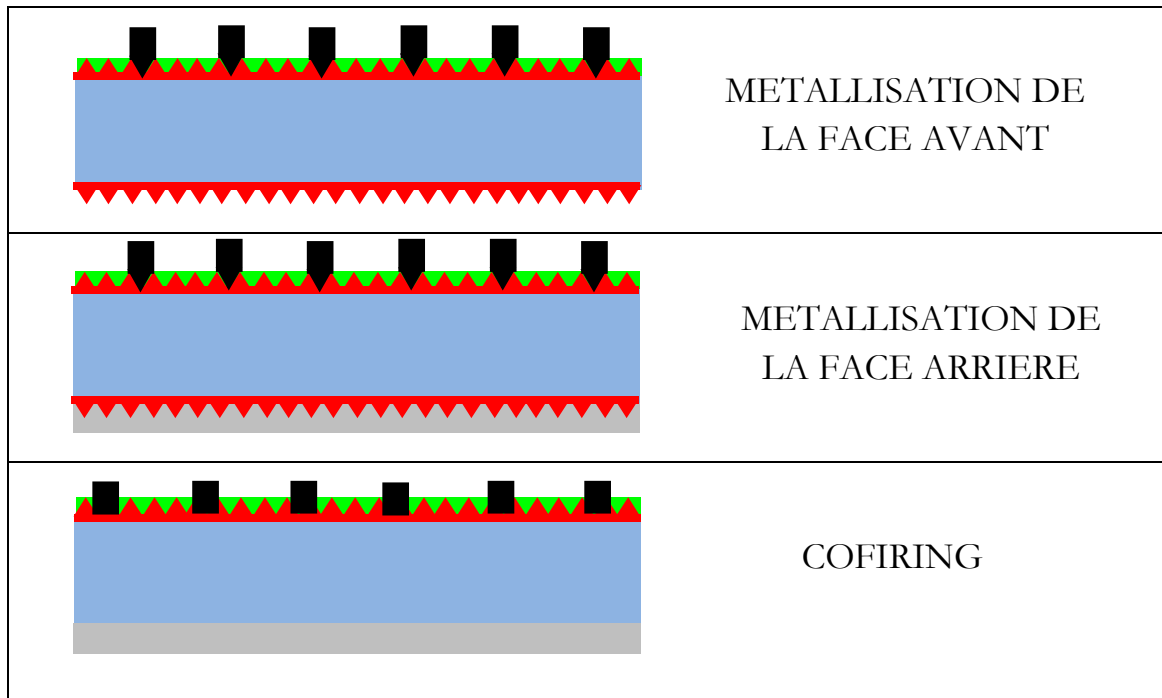


Figure III.10 : Schéma des différentes étapes de fabrication de cellules photovoltaïques en silicium multicristallin (les dimensions ne sont pas respectées).

9. Perte de puissance par les Résistances ohmiques

La Figure III.11 montre les résistances ohmiques des composants résistifs dans une cellule solaire.

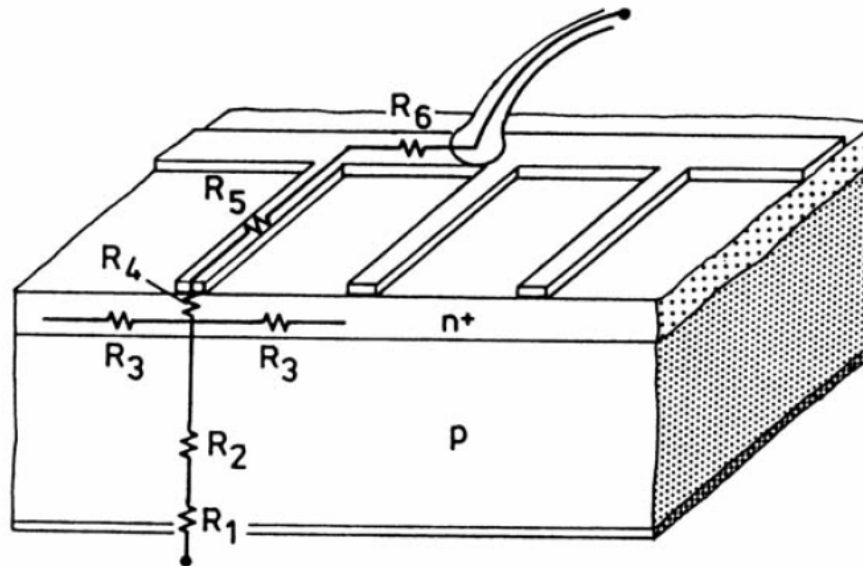


Figure III.11 : Les résistances ohmiques dans une cellule solaire [1].

Les différentes résistances sont :

- R_1 le contact métal-semiconducteur sur toute la surface arrière,
- R_2 le semiconducteur (base),
- R_3 l'émetteur entre deux doigts de la grille,
- R_4 le contact métal-semiconducteur,
- R_5 le doigt de la grille,
- R_6 la barre de collection (busbar) [1].

Dans une cellule solaire sérigraphiée, les pertes ohmiques sont associées à la circulation du courant à travers la résistance de la grille métallique, la résistance de contact métal-semiconducteur, la résistance du substrat et la région de l'émetteur. Pour un bon contact ohmique, à l'approche conventionnelle pour réduire les pertes ohmiques est de fournir une région fortement dopée entre le métal et le semiconducteur.

Pour évaluer toutes les pertes ohmiques dans une cellule solaire, on mesure la contribution de chaque composant résistif. Ceci est basé sur le calcul

de la perte de puissance relative liée au passage du courant par les divers composants résistifs de la cellule solaire normalisée à l'unité de surface de la cellule. Par signification normalisé à l'unité de surface de la cellule, signifie que toutes les expressions de perte de puissance pour les divers composants résistifs sont divisées par $2nab$, la surface de la cellule, c.à.d. les résistances des différents éléments résistifs sont des résistances carrées. [9].

- La perte de puissance liée au déplacement du courant à travers la région d'émetteur est donnée par :

$$P_{\square} = \frac{1}{3} J_L^2 b^2 R_{\square} \quad (III. 9)$$

- La perte de puissance causée par la résistance de contact est :

$$P_{contact} = J_L^2 b (\rho_c R_{\square})^{1/2} \quad (III. 10)$$

- La perte de puissance due à l'écoulement du courant le long du doigt de la grille est:

$$P_{finger} = \frac{2 J_L^2 a^2 b \rho_f}{3 \tau w} \quad (III. 11)$$

- La perte de puissance produite par l'écoulement du courant le long du busbar est :

$$P_{busbar} = \frac{1 J_L^2 a n^2 b^2 \rho_f}{3 \tau w} \quad (III. 12)$$

- Le courant traversant la région de la base provoque une perte de puissance donnée par,

Comme le contact arrière couvre la surface entière de la cellule, sa contribution à la perte de puissance a été considérée complètement négligeable. La puissance perdue totale est donnée par la somme des équations de (III. 9) à (III. 13).

$$P_{total} = P_{\square} + P_{contact} + P_{finger} + P_{busbar} + P_{base} \quad (III. 14)$$

Les équations (III. 9) à (III. 14) représentent la perte de puissance normalisée à l'unité de surface de la cellule [8].

a	Longueur de la cellule, égale aussi à la longueur des doigts et du busbar
b	Demi-espace entre les doigts
n	Nombre de doigts
t	Épaisseur des doigts et du busbar
w	Largeur des doigts
w'	Largeur du busbar
	Épaisseur de la base
l	
ρ_f	Résistivité de la pâte de sérigraphie
ρ_b	Résistivité de la base
ρ_c	Résistivité de contact pâte de sérigraphie / silicium
R_{\square}	Résistance carrée de l'émetteur
J_L	Densité du courant photogénéré
S	Surface de la cellule ($=2nb$). Largeur de la cellule ($=2nb$)

Tableau III.1: Différents paramètres pour calculer la perte de puissance par résistance série.

10. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter une vue d'ensemble des aspects théoriques et technologiques des cellules photovoltaïques en silicium multicristallin. Les différents types de pertes ont été également soulignés.

La métallisation de la grille de collecte dans les cellules solaires entraîne une perte de puissance, nous avons détaillé dans la deuxième partie du chapitre, les résistances dues aux pertes ohmiques, au niveau du semiconducteur, du métal, et au contact des deux matériaux.

Références Bibliographique

- [1] : **Adolf GEOTZBERGER, Joachim Knobloch, Bernhard Voss.** *Crystalline silicon solar cells*, pp102-113 , John Wiley and Sons; 1997
- [2] : **BENAÏCHA Mouna.** *Etude des matériaux semi-conducteurs III-V Application à la conversion photovoltaïque.* Thèse de magister en physique. Université Colonel Hadj Lakhdar Batna (Algérie).2007.
- [3] : **Jean-François LELIEVRE.** *Elaboration de $\text{SiN}_x\text{:H}$ par PECVD : optimisation des propriétés optiques, passivantes et structurales pour applications photovoltaïques.* Thèse de doctorat. INSA de Lyon. 2007
- [4] : **Bruno THUILLIER** *Caractérisation structurale des contacts ohmiques réalisés à partir d'encres métalliques sur cellules photovoltaïques en silicium multicristallin.* Thèse de doctorat. INSA de Lyon, 2001.
- [5] : **Fatima ABDO** *Croissance de couches minces de silicium par épitaxie en phase liquide à basse température pour applications photovoltaïques.* Thèse de doctorat. INSA de Lyon. 2007
- [6] : **Sébastien QUOIZOLA** *Épitaxie en phase vapeur de silicium sur silicium mesoporeux pour report sur substrats économiques et application photovoltaïque bas coût.* Thèse de doctorat. INSA de Lyon. 2003
- [7] : **Oleksiy NICHIPORUK** *Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités.* Thèse de doctorat. INSA de Lyon. 2005.
- [8] : **P N Vinod, B C Chakravarty, Mohan Lal, Ravi Kumar, S N Singh,** *A novel method for the determination of the front contact resistance in large area screen printed silicon solar cells.* Semicond. Sci. Technol. 15 (2000) 286–290.
- [9] : **P. N. Vinod,** *Application of power loss calculation to estimate the specific contact resistance of the screen-printed silver ohmic contacts of the large area silicon solar cells.* Mater Sci: Mater Electron (2007) 18:805–810.
- [10] : **Rémi de BETTIGNIES,** *Cellules photovoltaïques organiques dérivées de nouveaux systèmes conjugués.* Thèse de doctorat. Université d'Angers. 2003.
- [11] : **Jean-Pierre Charles, Alain Maouad, Abdellatif Zerga** « *La Jonction, du Solaire à la Microélectronique* » Rev. Energ. Ren. Vol.3 (2000)1-16

Chapitre IV

Résultats et discussions

1. Introduction

La grille métallique est utilisée à la face avant afin de collecter les porteurs photogénérés. Celle-ci doit répondre au compromis entre la résistance série et les pertes par ombrage, comme nous l'avons cité dans les chapitres précédents de ce manuscrit. Pour cela, dans ce chapitre, après avoir défini clairement le programme de simulation, ainsi que ses grandes séquences constituant son organigramme. Nous allons montrer la relation entre les pertes par ombrage et par résistance série. Ensuite nous exposons une étude de l'influence de quelques paramètres importants de la simulation affectant la conception d'une grille de collecte d'une cellule solaire conventionnelle. Enfin nous montrons les taux de contribution de chaque élément résistif à la résistance série sous différentes conditions.

2. Programme de simulation

Ce programme vise l'optimisation des distances entre les doigts (plus précisément: la périodicité des doigts) de la face avant des cellules solaires ayant un seul busbar central.

Les données nécessaires à cet effet (les paramètres de la cellule, les dimensions de la grille, les résistances spécifiques) sont saisies et enregistrées.

Le résultat du calcul est placé dans un tableau présentant l'effet d'ombre, la résistance série, aussi bien que la perte de rendement due à l'effet de la distance entre les doigts. Ce tableau peut aussi déduire la distance entre doigts optimale; de même que l'effet de cette distance peut être mesuré. Une présentation graphique est également disponible (rendement, contribution de la résistance série, ombre en fonction de la distance entre les doigts).

L'organigramme suivant représente les étapes principales de ce programme.

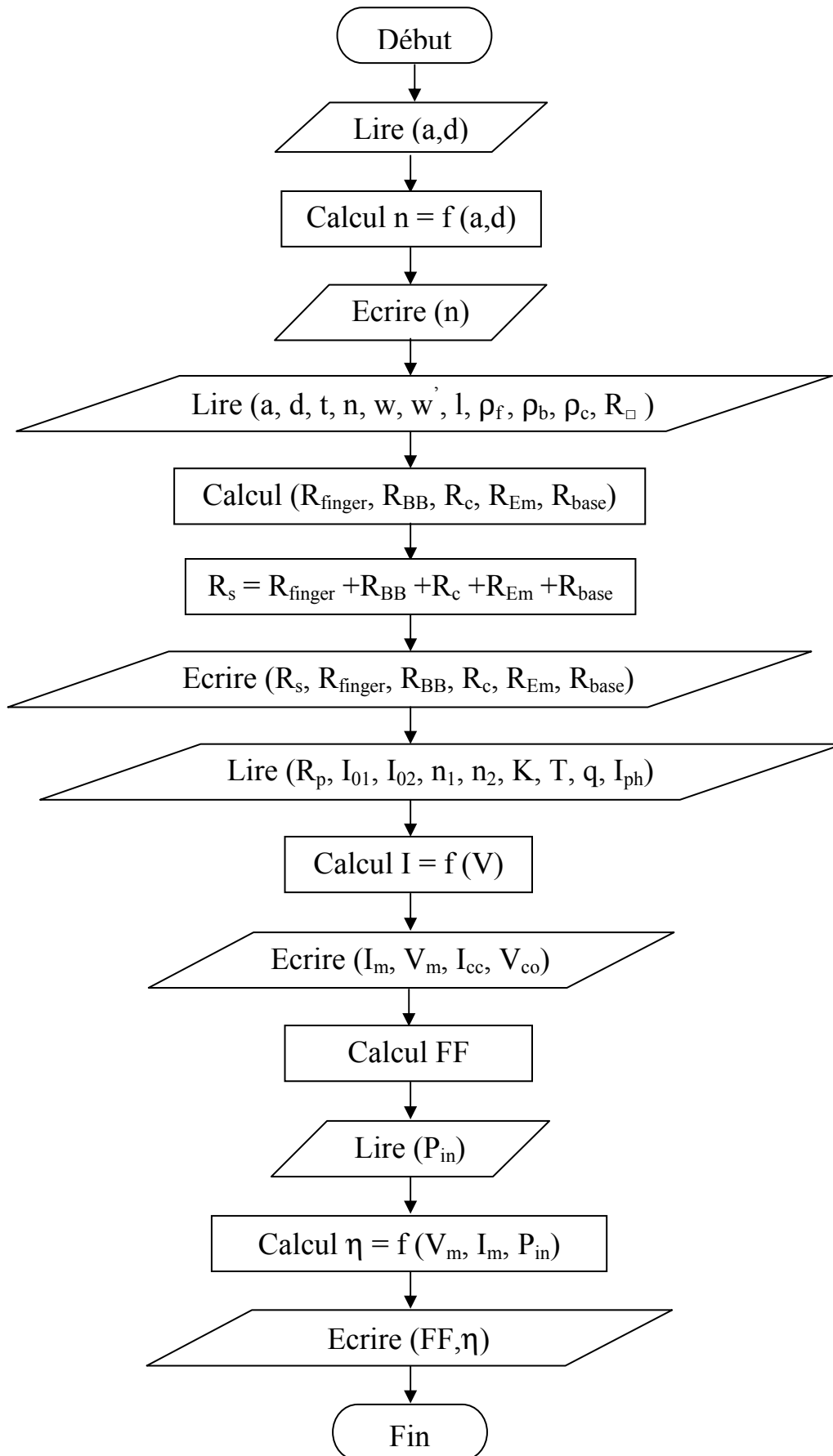


Figure IV.1 : Organigramme représentant les étapes importantes du programme utilisé pour la simulation de la résistance série.

	Paramètres	Valeurs
<i>a</i>	Longueur de la cellule	50 mm
<i>d</i>	Espace entre les doigts ($d=2b$)	[0,5-5] mm
<i>t</i>	Epaisseur des doigts et du busbar	10 μm
<i>w</i>	Largeur des doigts	80 μm
<i>w'</i>	Largeur du busbar	2 mm
<i>l</i>	Epaisseur de la base	300 μm
<i>P_f</i>	Résistivité de la pâte de sérigraphie	4,5 .10 ⁻⁶ $\Omega\text{.cm}$

ρ_b	Résistivité de la base	1 $\Omega \cdot \text{cm}$
ρ_c	Résistivité de contact	5 $\cdot 10^{-3}$ $\Omega \cdot \text{cm}^2$
R_{sq}	Résistance carrée de l'émetteur $(R)_{sq}$	40 Ω / \square
R_p	Résistance parallèle	5000 $\Omega \cdot \text{cm}^2$

Tableau IV.1 : Paramètres utilisés pour simuler la perte de puissance par résistances série [2-3].

Le tableau ci-dessus représente les valeurs des différents paramètres physiques et technologiques utilisés dans cette simulation. Ces valeurs sont fixées en fonction des données de la littérature et celles de la technologie.

3. Compromis entre l'ombre et la résistance série

En plus de maximiser l'absorption et de réduire au minimum la recombinaison, la condition finale nécessaire pour concevoir une cellule solaire de rendement élevé est de minimiser ses pertes résistives parasites. Les shunts et les pertes de résistance série diminuent le facteur de forme et le rendement d'une cellule solaire. Une résistance de shunt nuisiblement basse est un défaut de traitement plutôt qu'un paramètre de conception. Cependant, la résistance série, imposée par la conception des contacts avant et de la résistance d'émetteur, doit être rigoureusement conçue pour chaque type et taille de cellule solaire afin d'optimiser son rendement.

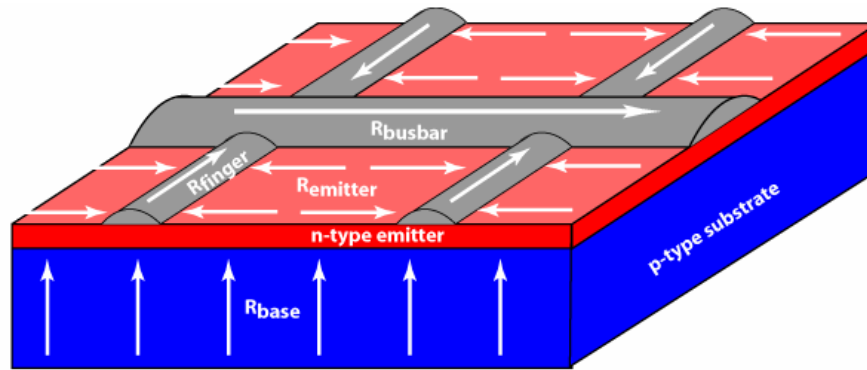


Figure IV.2 : Composants résistifs et écoulements du courant dans une cellule solaire.

La résistance série dans une cellule solaire a trois origines : premièrement, le mouvement du courant à travers l'émetteur et la base ; deuxièmement, la résistance de contact entre le métal et le silicium ; et finalement la résistance du métal de contact avant et arrière [4].

Les contacts métalliques supérieurs sont nécessaires pour collecter le courant généré par la cellule. Le " busbar " est relié directement aux fils externes, alors que les "doigts" sont des secteurs plus fins de métallisation qui collectent le courant pour le délivrer au busbar. Le point principal dans la conception des contacts avant est l'équilibre entre les pertes résistives liées à une grille largement espacée et la réflexion du rayonnement solaire provoquée par une grande partie de la surface avant de la cellule solaire couverte par le métal.

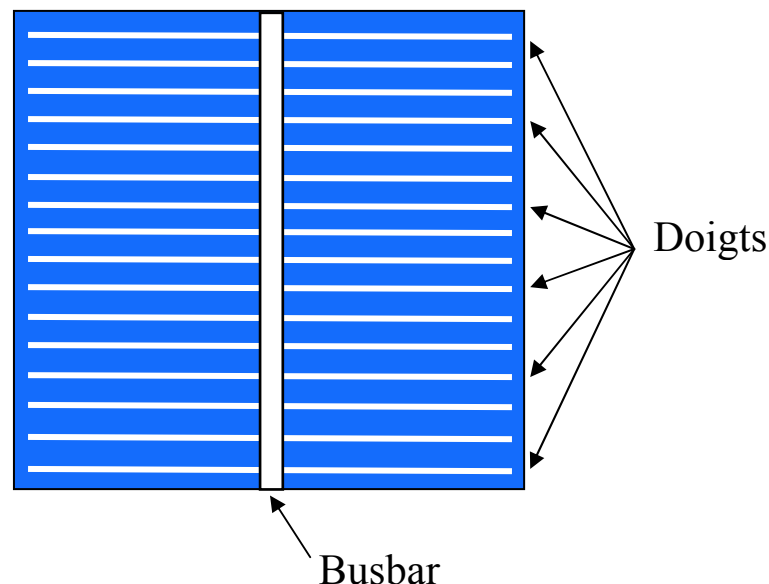


Figure VI.3 : Conception de contact avant dans la cellule solaire utilisée dans la simulation. Le busbar relie les doigts ensemble et passe le courant produit aux contacts électriques externes.

Les Pertes par effet d'ombre sont provoquées par la présence du métal sur la surface supérieure de la cellule solaire qui empêche la lumière de pénétrer à la cellule solaire. Elles sont déterminées par la transparence de la surface supérieure, qui est définie comme étant le taux de la surface couverte par le métal. La transparence est déterminée par la largeur des lignes métalliques sur la surface avant et de l'espacement entre elles. Une importante limite en pratique est que la minimisation de cette largeur est inhérente à la technologie utilisée pour la métallisation [1].

Il est clair que la surface occultée est proportionnelle à la distance entre les doigts de la grille. Plus ceux-ci sont rapprochés, plus la surface de la grille métallique est grande. Par conséquent, la surface exposée à la lumière diminue.

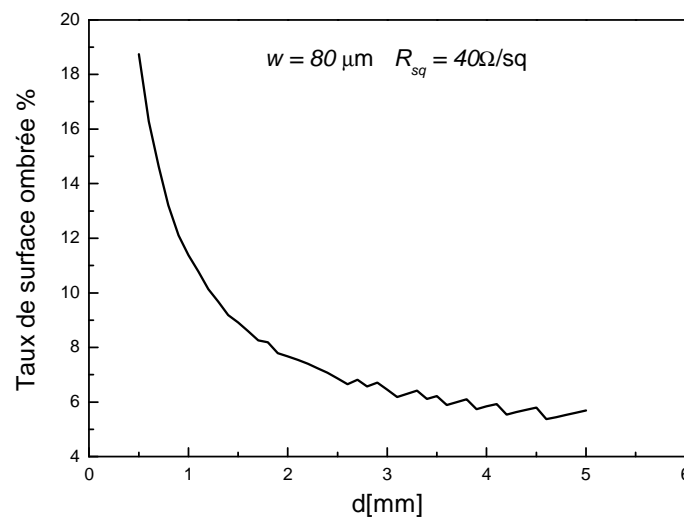


Figure IV.4 : Le rapport entre la surface ombrée et la distance entre les doigts.

On voit bien sur la Figure IV.4 que pour une distance de 0.5mm, la surface ombrée peut atteindre 19% de la surface active de la cellule. Ce taux diminue en espaçant les doigts les uns des autres.

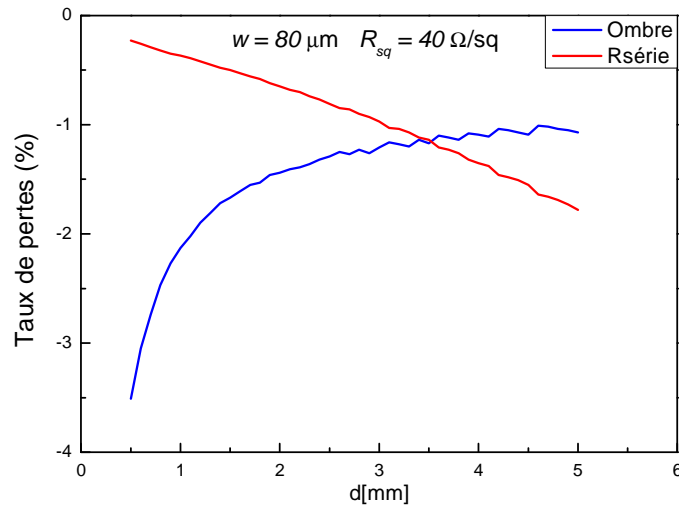


Figure IV.5 : Relation entre les pertes par l'ombre et par résistance série.

Nous avons vu dans les paragraphes précédents que la surface ombrée diminue en fonction de la distance inter-doigts. Même l'énergie perdue due aux rayonnements réfléchis par la surface métallique diminue en augmentant l'espace entre les doigts. Cette perte du rendement peut aller de 3.5% pour une distance de 0.5mm jusqu' à 1% pour d=5mm.

Par contre, en se basant sur la loi générale de la résistance $R = \rho l / S$, celle-ci est inversement proportionnelle à la surface, donc la diminution de la distance inter-doigts rend la surface de la grille métallique plus importante. Ceci affaiblit la résistance série et par conséquent les pertes par cette dernière diminuent jusqu' à $0.23 \Omega \text{cm}^2$ pour d=0.5mm. Par ailleurs, cette valeur augmente pour les grandes distances séparant les doigts.

Enfin, la relation entre la résistance série et l'ombre est inversement proportionnelle, et l'optimisation de la grille métallique d'une cellule solaire repose sur ce compromis.

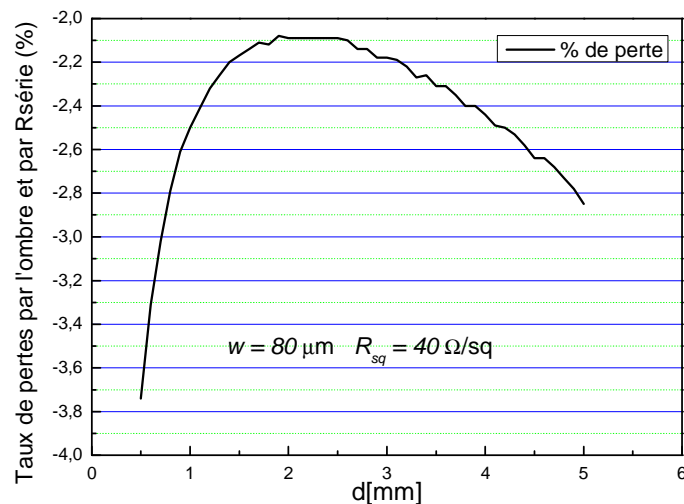


Figure IV.6 : Evolution des pertes par l'ombre et par résistance série.

L'énergie perdue au niveau de la grille métallique est la somme des pertes dues à l'ombre et à la résistance série. La figure IV.6 représente l'évolution de cette perte en fonction de l'espace entre les doigts. On remarque une forte diminution entre 0.5 et 2mm due à l'importance de l'effet d'ombre. Une stabilisation entre 2 et 2.5 mm, puis une augmentation à cause de la résistance série.

En conclusion, on déduit que pour les faibles distances ($< 2\text{mm}$) c'est l'effet d'ombre qui domine la perte de rendement. par contre, dans le domaine des grandes distances entre doigts ($> 3\text{mm}$) c'est la résistance série qui est responsable de la chute du rendement.

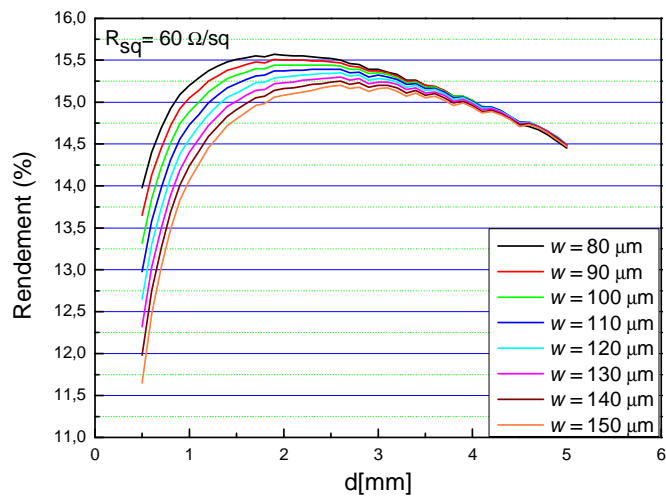
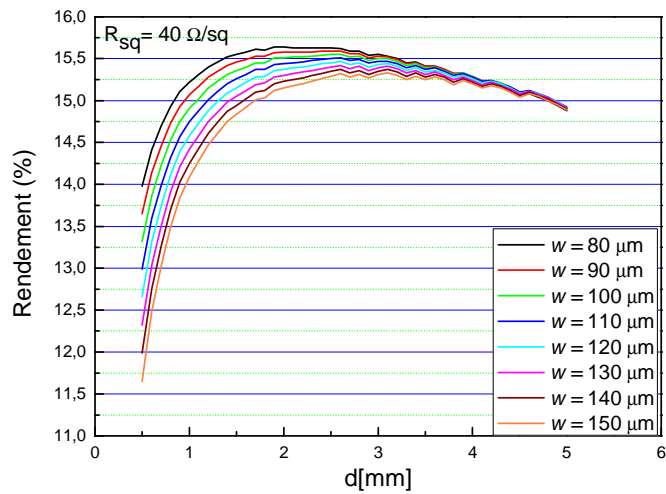
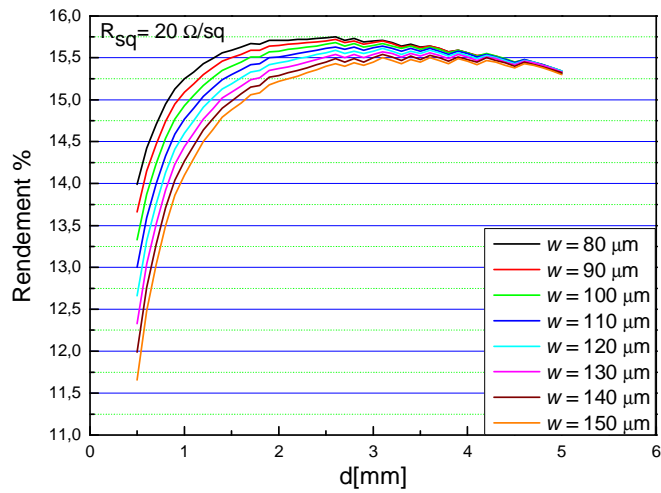
4. Effet de la résistance carrée de l'émetteur et de la largeur des doigts

Ayant comme objectif l'optimisation de la géométrie des contacts métalliques de la face avant des cellules solaires conventionnelles, nous avons étudié l'influence de quelques paramètres parmi les plus importants. Dans cette partie nous allons voir l'effet de la largeur des doigts de la grille de collecte, et la résistance carrée de l'émetteur.

Les pertes issues de la résistance de contact se produisent à l'interface entre la cellule solaire en silicium et le contact métallique. Pour maintenir les

pertes de contact avant les plus faibles possibles, la couche n^+ doit être aussi fortement dopée que possible. Cependant, un niveau de dopage élevé engendre d'autres problèmes. Si un niveau élevé de phosphore est répandu dans le silicium, le phosphore excessif se trouve sur la surface de la cellule, créant "une couche morte", où les porteurs générés par la lumière ont peu de chance d'être collectés. En effet, les recombinaisons par un mécanisme d'Auger deviennent prépondérants. Beaucoup de cellules commerciales ont une faible réponse "bleue" c.-à-d. à cause de la présence de cette "couche morte". Par conséquent, la région sous les contacts devrait être fortement dopée, alors que le dopage de l'émetteur est commandé par la différence entre réaliser un faible courant de saturation dans l'émetteur et maintenir une longueur de diffusion élevée [1].

Sur les cinq figures suivantes nous étudions l'effet de la résistance carrée de l'émetteur et la largeur des doigts sur le rendement en fonction de l'espace inter-doigts.



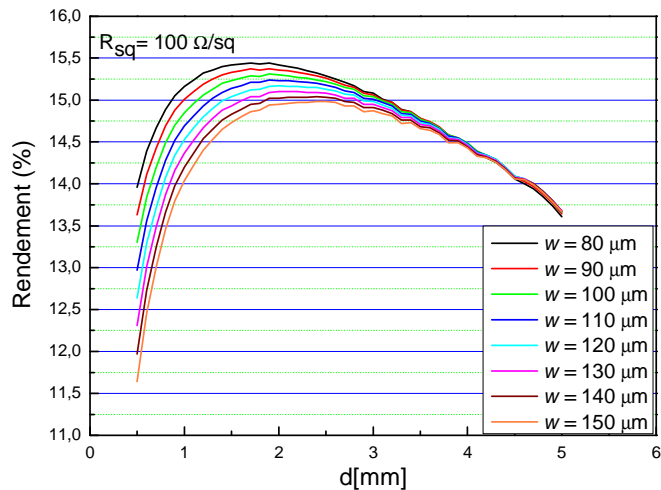
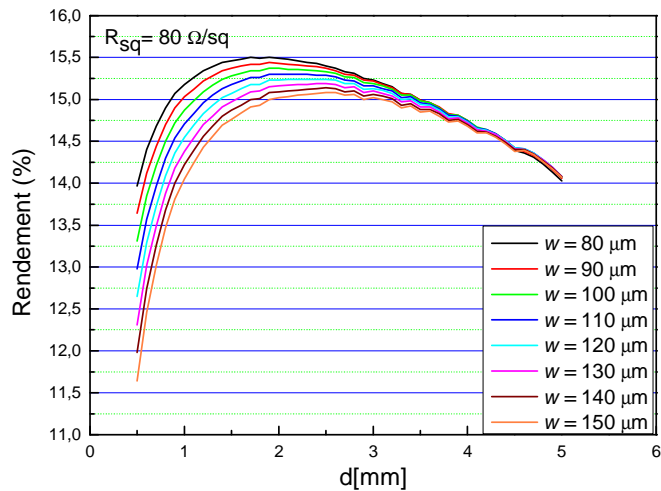


Figure IV.7 : Effet de la résistance carrée d'émetteur pour différentes largeurs de doigts.

En fixant la résistance carrée de l'émetteur, on constate qu'une augmentation de $10\mu\text{m}$ de la largeur des doigts affaiblie le rendement de 0.33% pour une distance entre doigts égale à 0.5mm , plus cette distance augmente plus le taux de variation diminue jusqu'à la juxtaposition totale de toutes les courbes.

Dans l'intervalle des petites distances la moindre variation change fortement le taux de la surface occultée, ainsi la largeur aura une grande influence sur le rendement. En espaçant les doigts, leur largeur devient de plus en plus négligeable devant d , et son influence diminue jusqu'à ne plus avoir aucun effet. Dans ce cas, la cellule fournit le même rendement pour les différentes largeurs de doigts de la grille.

En ce qui concerne la variation du rendement en fonction de la résistance carrée de l'émetteur, nous remarquons que pour des faibles résistances carrées ($20\Omega/\square$), le rendement augmente rapidement pour atteindre un maximum, puis se stabilise avec de légères perturbations. Avec l'augmentation de la résistance carrée, on a une chute du rendement après avoir atteint son maximum. Cette diminution est de plus en plus importante pour les résistances élevées. On s'aperçoit que ce maximum lui-même subi une légère diminution en augmentant la résistance carrée.

Actuellement, beaucoup d'industriels de pâtes métalliques concourent pour l'élaboration de nouveaux produits permettant de contacter sur des émetteurs fortement résistifs ($80-100\Omega/\square$) bénéfiques pour la passivation [5].

Par ailleurs, nous avons vu précédemment que le domaine des faibles distances est dominé par l'effet d'ombre, donc la variation de la résistance carrée de l'émetteur n'aura pas d'influence sur le rendement. Par contre, celle-ci est considérée comme un des paramètres de calcul de quelques composantes de la résistance série (résistance d'émetteur et de contact). Son augmentation implique une élévation de la résistance série, qui influe sur l'intervalle des grandes distances inter-doigts, ce qui explique cette chute du rendement au-delà d'environ 2mm.

Pour mieux comprendre cela, nous avons tracé la courbe du rendement d'une seule largeur pour différente résistance carrée.

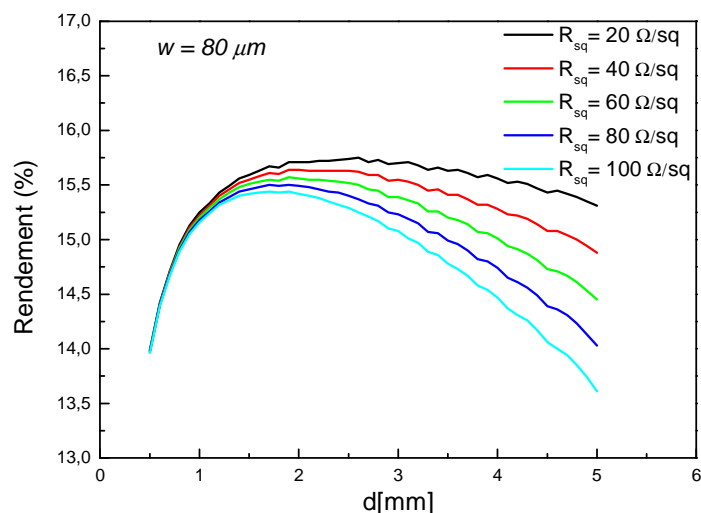


Figure IV.8 : Influence de la résistance carrée.

A partir des résultats de cette figure, nous constatons que jusqu'à $d=1\text{mm}$ les courbes sont complètement confondues, ce qui signifie que la variation de la résistance carrée n'a aucun effet dans cette plage de variation de d . Tandis que lorsque les doigts commencent à s'éloigner les uns des autres, les courbes des différentes résistances se distinguent et elles s'écartent les unes des autres également. Dans ce cas l'effet de la résistance carrée prend de l'importance.

5. Impact de l'espacement des doigts sur la résistance d'émetteur

Un facteur important dans la conception de contact avant est celui des pertes résistives de l'émetteur. Comme il a été montré dans les équations du bilan de pertes résistives (chapitre III), la perte de puissance dans l'émetteur dépend du cube de l'espace inter-doigts, et donc une distance courte entre les doigts est souhaitable pour une faible résistance de l'émetteur.

Basée sur la résistance carrée, la perte de puissance due à la résistance d'émetteur peut être calculée en fonction de l'espacement de doigt des contacts avant. La figure IV.9 montre la distribution du courant dans l'émetteur et les doigts de la grille. Le courant circulant verticalement dans la base est détourné horizontalement dans l'émetteur, avant d'être collecté par les doigts. Cependant, la distance que le courant traverse dans l'émetteur n'est pas constante. Le courant peut être collecté de la base près du doigt et il a donc seulement une distance courte à traverser au doigt ou, alternativement, si le courant pénètre dans l'émetteur entre les doigts, alors la longueur du chemin résistif est la moitié de l'espacement entre deux doigts [1].

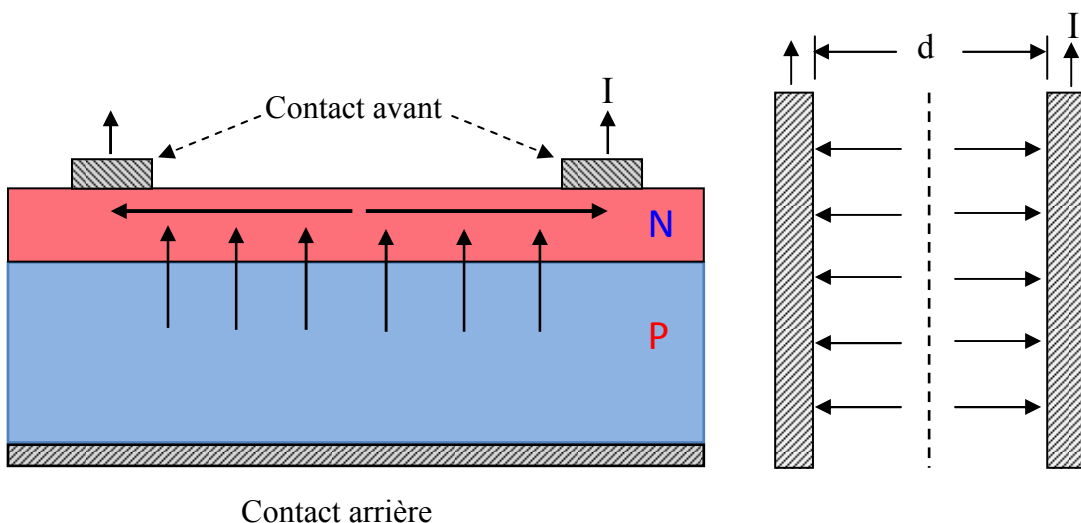


Figure VI.9 : Écoulement du courant idéalisé du point de génération au contact externe dans une cellule solaire. L'émetteur est en général beaucoup plus mince que celui de la figure.

6. La largeur du busbar

Afin d'effectuer une étude complète concernant le compromis entre l'ombre et la résistance série, il est nécessaire d'analyser l'impact de la largeur du busbar sur le rendement, et en déduire une largeur optimale adaptée à notre cellule.

Vu l'importance de la dimension de la largeur du busbar (de l'ordre du millimètre), sa variation aura un effet considérable aussi bien sur la résistance série, que sur le taux d'ombre et par conséquent sur le rendement de la cellule.

On remarque qu'un busbar de 1mm de largeur offre un rendement élevé avec un maximum situé à $d=2\text{mm}$, et une courbe de variation contenant moins de perturbations.

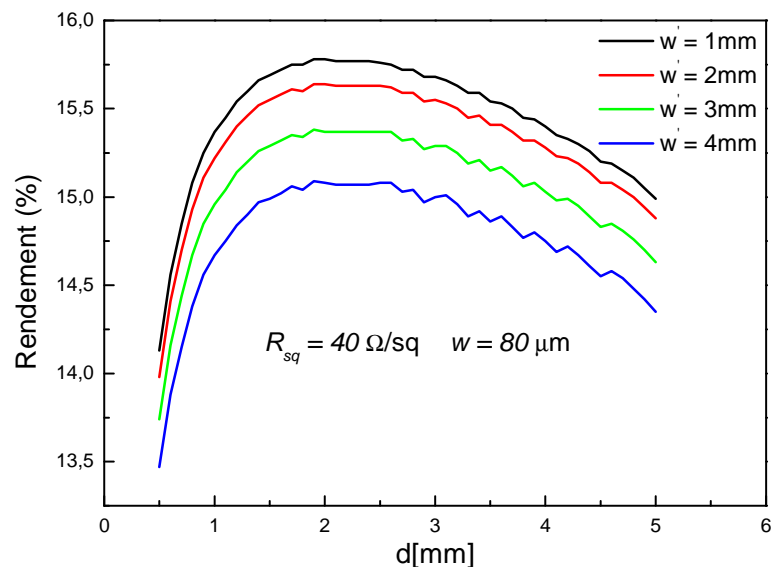
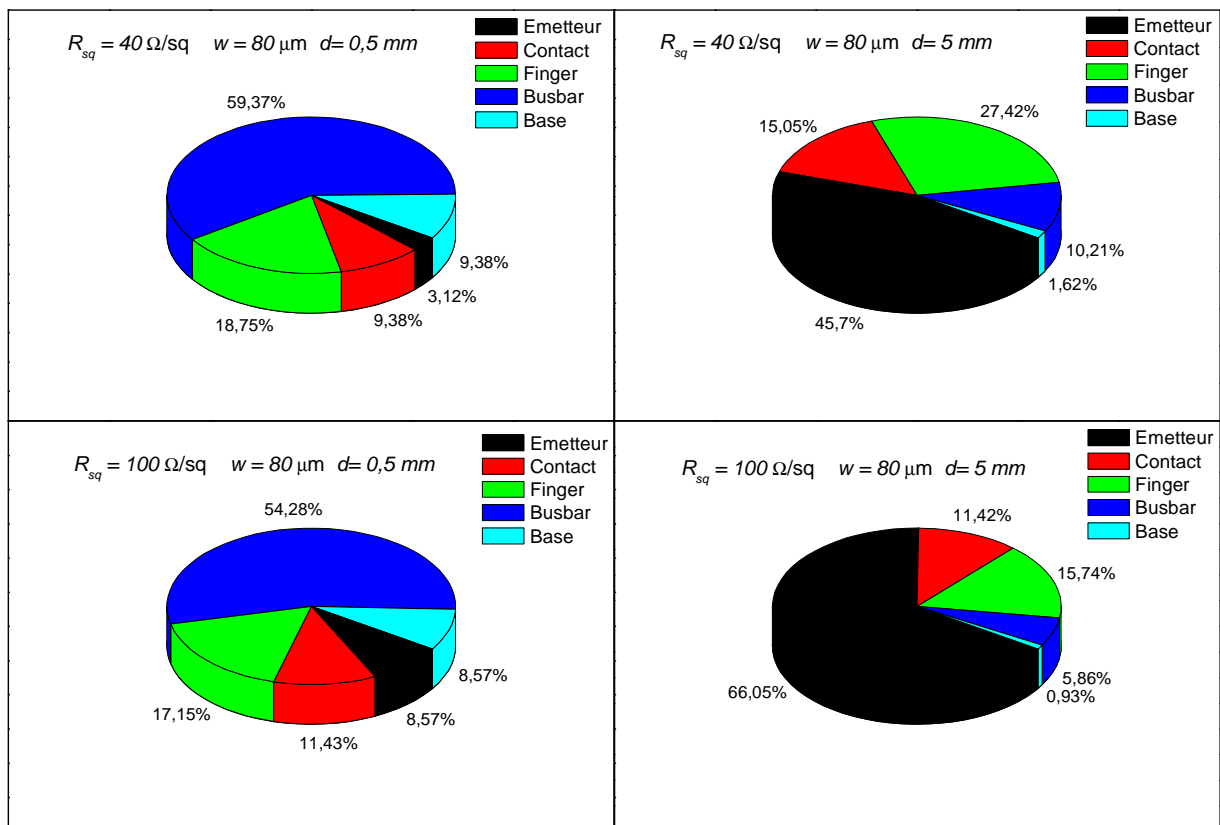


Figure IV.10.: Variation du rendement en fonction de la largeur du busbar.

Toutefois, nous sommes contraints en technologie parfois à utiliser de larges busbar afin de pouvoir réaliser des soudures du ruban permettant la connexion des différentes cellules solaires constituant les modules.

7. Contribution des composants résistifs à la résistance série

D'après les résultats précédents, la résistance série augmente en fonction de l'espace inter-doigts et la résistance carrée de l'émetteur. Pour connaître quel est le composant résistif responsable de cette augmentation, nous avons calculé les taux de contribution de chacune des cinq résistances constituant la résistance série (la résistance de l'émetteur entre deux doigts,



du contact, des doigts, du busbar et de la base)

Figure IV.10 : Changement de la contribution des différents composants résistifs à la résistance série.

Par l'analyse des deux premiers diagrammes ($R_{sq} = 40 \Omega/sq$), la variation de d , n'a aucun effet sur la structure de la base et du busbar, ainsi leurs résistances restent constantes. Ainsi, seulement les résistances de l'émetteur, du contact et des doigts subissent des changements. Nous remarquons qu'entre ces trois c'est la résistance de l'émetteur entre deux doigts qui a fortement augmentée (de

3.12% à 45.7%). Par conséquent les taux de contribution de tous les composants résistifs changent.

Même remarque pour une résistance carrée plus élevée. Dans ce cas la résistance de l'émetteur devient encore plus importante, elle atteint 66.05% de la résistance série pour $R_{\square} = 100 \Omega/\square$. Ce qui justifie les résultats des courbes du rendement (*Figure IV.7*).

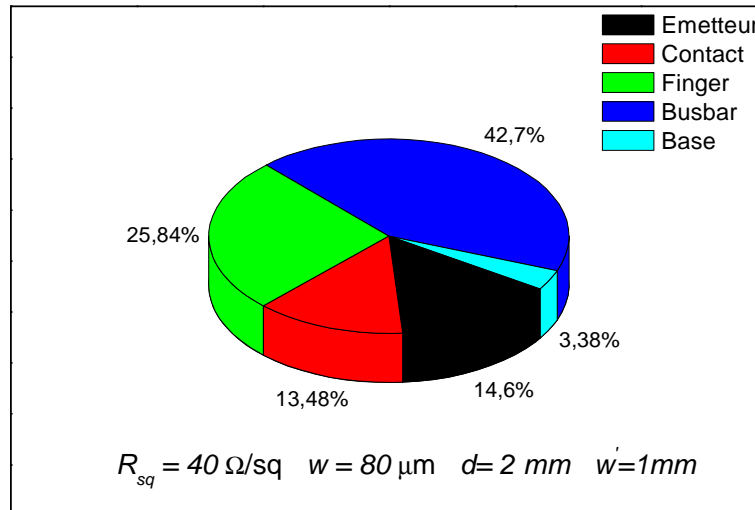


Figure IV.11 : Contribution des composants résistifs à la résistance série dans les conditions optimales .

On se met aux conditions optimales ; une résistance carrée conventionnelle égale à $R_{\square} = \frac{40\Omega}{\square}$, la plus petite largeur de doigt autorisée par la

technique de sérigraphie , une largeur du busbar égale à $w' = 1 \text{ mm}$, et avec 2 mm d'espacement entre les doigts nous obtenons le rendement

maximal .

Dans ce cas de figure proche du spectre industriel de la majorité des cellules industrielles au silicium multicristallin, c'est la grille de collecte (finger + busbar) qui prédomine les pertes résistives. En particulier, la résistance du busbar

avec une fraction de **42.7%** de la résistance série. Suivie par la résistance des doigts avec une fraction de 25.8%. ensuite, la résistance d'émetteur et du contact avec des parts presque égales (~14% chacune). Enfin la résistance de la base ayant la plus petite contribution de **3.38%**.

Remarque :

Sur la figure suivante nous traçons la courbe du rendement dans les conditions optimales, on remarque qu'en augmentant la distance inter-doigts optimale d'un millimètre c.-à-d. 3mm ce qui correspond à un nombre de doigts égale à 17 au lieu de 2mm avec 25 doigts, nous allons perdre que 0.1% du rendement maximal. Cependant cela permet une économie de la pâte de sérigraphie. En effet une cellule solaire débitant un bon rendement et à bas coût.

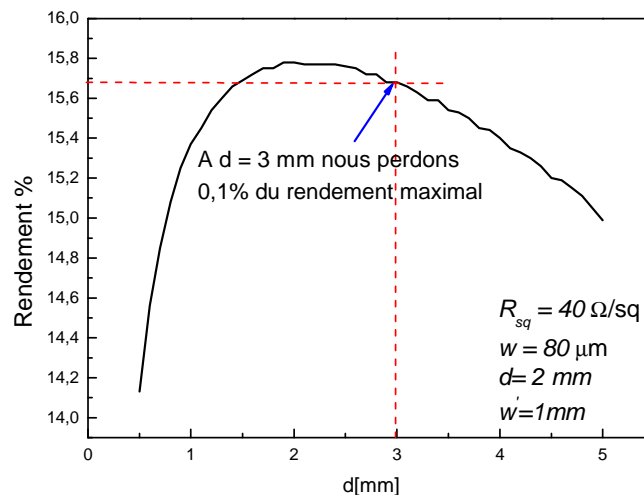


Figure IV.12 : Diminution du nombre des doigts par l'augmentation de l'espace inter-doigts afin d'économiser la pâte.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié de plus près la relation entre la surface ombrée par les contacts métalliques et la résistance série d'une cellule solaire conventionnelle. Nous avons vu aussi l'évolution de chacune entre elles en fonction de l'espace inter-doigts de la grille de collecte.

La deuxième partie concerne l'effet de la largeur des doigts, et la résistance carrée de l'émetteur sur le rendement de la cellule solaire. Nous avons constaté

que la résistance de l'émetteur est fortement liée à ces deux paramètres. Ainsi la largeur du busbar joue un rôle important dans l'optimisation de la géométrie d'une grille de collecte.

Après avoir calculer les taux de contribution de chaque composant résistif à la résistance série, on déduit que la résistance de l'émetteur entre deux doigts est responsable de l'augmentation de la résistance série.

Enfin, nous avons obtenus le résultat suivant : pour une cellule carrée de 50mm, et busbar central

on a un rendement maximal de .

Références bibliographiques

- [1] : **Christiana Honsberg, Stuart Bowden**, Photovoltaics CDROM. By National Science Foundation(NSF).
- [2] : **P N Vinod, B C Chakravarty, Mohan Lal, Ravi Kumar, S N Singh**, «*A novel method for the determination of the front contact resistance in large area screen printed silicon solar cells.* Semicond. Sci. Technol. 15 (2000) 286–290. »
- [3] : **P. N. Vinod**, «*Application of power loss calculation to estimate the specific contact resistance of the screen-printed silver ohmic contacts of the large area silicon solar cells.* Mater Sci: Mater Electron (2007) 18:805–810. »
- [4] : **D. Pysch, A. Mette, S.W. Glunz**, «*A review and comparison of different methods to determine the series resistance of solar cells* » Solar Energy Materials & Solar Cells 91 (2007) 1698–1706.
- [5] : **Mohamed M. Hilali, Ajeet Rohatgi, Sally Asher** «*Development of Screen-Printed Silicon Solar Cells With High Fill Factors on 100Ω/sq Emitters* » IEEE Transactions On Electron Devices, vol. 51, no. 6, june 2004

Conclusions générales et perspectives

Le photovoltaïque représente aujourd'hui une sérieuse alternative aux énergies non-renouvelables qui sont imposées à disparaître. Il faut cependant continuer à investir dans la recherche photovoltaïque pour aller dans le sens d'un développement durable accompagné d'une moindre pollution et surtout à faible coût.

L'objectif de ce travail était d'optimiser les dimensions géométriques de la grille de collecte des cellules solaires conventionnelles à base de silicium multicristallin. En particulier, il s'agissait d'une mise en évidence d'un compromis entre la résistance série et l'effet d'ombre.

Pour mener à bien cette étude, nous avons commencé par étudier en profondeur la structure métal-semiconducteur pour bien comprendre les mécanismes de transport impliqués lors du passage du silicium vers la grille de collecte. Ensuite, nous avons cité trois techniques de métallisation qui sont la photolithographie, l'évaporation sous vide et la sérigraphie. En indiquant les avantages et les inconvénients de chacune d'elles, on déduit que la sérigraphie est bien adaptée pour une production en série sur une grande échelle industrielle de photopiles au silicium cristallin.

Avant d'entamer la simulation des pertes par résistance série et par l'ombre, nous avons décrit le fonctionnement et les caractéristiques de la cellule photovoltaïque conventionnelle au silicium, les étapes de fabrication ainsi que les différents facteurs de pertes influençant le rendement.

Finalement, dans le dernier chapitre nous nous sommes focalisés sur l'optimisation de la géométrie de la grille de collecte. En premier temps nous avons défini la relation entre la résistance série et l'effet d'ombre ainsi que leur évolution par rapport à la distance inter-doigts. Grâce à notre programme de simulation, nous avons étudié l'effet des paramètres les plus importants (la largeur des doigts et du busbar, la résistance carrée de l'émetteur) en fonction de l'espace inter-doigts (paramètre primordial de la grille collectrice).

Nous avons constaté que l'impact de la largeur des doigts est observable seulement dans le domaine des faibles espaces inter-doigts. En effet, dans le cas

des doigts très rapprochés, le courant généré circulant au niveau de l'émetteur sera rapidement collecté, et la perte des porteurs photogénérés sera réduite au minimum. Mais ces contacts métalliques forment des obstacles opaques pour les rayonnements solaires, en diminuant ainsi la quantité de lumière absorbée par le semiconducteur.

Dans le cas des doigts éloignés, le courant généré sera obligé de parcourir une distance assez grande pour atteindre les doigts de la grille de collecte, traversant la résistance de l'émetteur qui affaiblie sa valeur. Plus celle-ci est élevée, plus la densité du courant s'atténue. Les porteurs photogénérés risquent de se recombiner le long de ce parcours. Bien que la surface exposée à la lumière est considérable permettant aux rayonnements solaires de pénétrer à l'intérieur de la cellule.

Après avoir calculer les taux de contribution de chaque composant résistif à la résistance série, on déduit que la résistance de l'émetteur entre deux doigts est responsable de l'augmentation de la résistance série pour les grandes distances inter-doigts.

Cette étude nous a permis de mener un rendement maximal de 15.78%, pour les conditions optimales adéquates à notre cellule : une résistance carrée d'émetteur égale à $40\Omega/\square$, un busbar de 1mm et des doigts larges de $80\mu\text{m}$ espacés de 2mm.

Enfin, la relation entre la résistance série et l'ombre est inversement proportionnelle, et l'optimisation de la grille métallique de n'importe quelle cellule solaire repose sur ce compromis.

En perspectives, cette étude suscite de nombreuses interrogations et ouvre la voie à de riches axes de recherche. Parmi les différentes directions d'investigation, nous pouvons citer une étude plus approfondie sur le rôle des différents paramètres de métallisation tel que la pâte de sérigraphie (la résistivité de la pâte), l'optimisation des écrans et des études plus approfondies concernant tout les paramètres influents sur le rendement dans le domaine de la métallisation.

Enfin, les applications aux cellules photovoltaïques conventionnelles basées exclusivement sur le silicium méritent d'être poursuivies afin de réduire le coût de fabrication pour des rendements de conversion élevés.

