

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE « Dr. TAHAR MOULAY » DE SAIDA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : PHYSIQUE

Option : Matériaux

Par

Bentahar Yacine

Sur le thème

*Simulation d'un Contact Métal-Semi Conducteur Pour
des Application Photovoltaïques.*

Soutenu le : 10/07/2019 devant le jury composé de :

Mr. Elkeurti Mohammed	Pr	Université Moulay tahar - Saida	Président
Mr. Mahi Abdelhamid	MCA	Université Nour Elbachir - Elbayadh	Encadreur
Mr. Meskine Mohamed	MCA	Université Moulay tahar - Saida	Co-encadreur
Mr. Doumi Bendouma	MCA	Université Moulay tahar - Saida	Examineur
Mr. Mokaddem Allel	MCA	Université Nour Elbachir - Elbayadh	Examineur

Année Universitaire 2018 - 2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

*Avec toute ma reconnaissance j'ai
l'immense honneur de dédier ce
modeste mémoire*

Mes chers parents pour leur soutien.

Mes très chers frères et ma chère sœur.

Tous les membres de ma famille.

Tous mes enseignants sans exception.

Tous les participants pour leurs aides.

Tous mes collègues et ma promotion.

En fin à tous ceux qui m'aiment.

**QUE CE TRAVAIL SOIT L'ACCOMPLISSEMENT DE VOS VŒUX TANT
ALLÉGUÉS. MERCI D'ÊTRE TOUJOURS LÀ POUR MOI.**

YACINE

REMERCIEMENT

*A*vant tout, je tiens à remercier *ALLAH*, qui m'a donné la patience et la santé durant toutes ces années et qui grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

*J*e tiens à remercier le Pr *MAHI* en tant que promoteur et qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'il a consacré, et sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

*J*e souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux membres de jurée d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

*J*e souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leurs aides et surtout *MOUMEN*, *MILOUD* et *ABDESSAMED*.

*J*e tiens aussi à remercier tous les *COLLEAGUES* qui ont contribué à la progression de mes recherches, et aussi pour les discussions conviviales et les conseils qu'ils m'ont donné, qui ont vraiment été d'une grande aide.

*U*n spécial remerciement pour les personnes les plus chères à mes yeux, ceux qui m'ont soutenu, encouragé et n'ont pas cessé de prier pour ma réussite, mes très chers *PARENTS*.

MERCI à toutes et à tous

ملخص

في السنوات الأخيرة، تم توجيه جهود الباحثين نحو أداء الخلايا الشمسية التي تعتمد على GaAs والتي تم استخدامها على نطاق واسع بسبب كفاءتها العالية و انخفاض تدهورها ضد الإشعاعات في الفضاء. ومع ذلك، فإن المردود التي وصلت اليه الخلايا الشمسية الأولى كان في حدود 10٪ فقط. هذه المشكلة قد تم حلها جزئياً عن طريق التخفيض في إعادة التركيب السطحي والحجمي.

في هذه الأطروحة، سنقوم بإجراء دراسة مقارنة لخلية شمسية من نوع جدار شوتكي ذات أشباه الموصلات GaAs وأشباه الموصلات ذات فجوة متغيرة $Al_{1-x}Ga_xAs$ ، والتعامل مع تأثير الحقن، وسمك طبقة BSF ومعدل إعادة التركيب السطحي S وتدرج فجوة النطاق المعدوم على النتائج التي تم الحصول عليها

RESUME

Dans ces dernières années, les efforts des chercheurs se dirigeaient vers la performance des cellules solaires à base de GaAs qui ont été largement utilisées à cause de leur rendement élevé et leur faible dégradation face aux irradiations dans l'espace. Cependant, le rendement réalisé pour les premières cellules solaires était seulement de l'ordre de 10%. Ce problème a été résolu partiellement par la diminution de la recombinaison superficielle et volumique.

Dans ce mémoire on va faire une Etude Comparative d'une Cellule Solaire à Barrière Schottky avec un semi-conducteur GaAs et semi-conducteur à bande interdite variable $Al_{1-x}Ga_xAs$, et de traiter les effets de dopage, l'épaisseur de couche BSF et la vitesse de recombinaison superficielle S et le gradient de la bande interdite sur les résultats obtenues.

ABSTRACT

In the last years, researchers' efforts have been directed towards the performance of solar cells based on GaAs which have been widely used because of their efficiency and low degradation against irradiations in space. However, the efficiency achieved for the first solar cells was only in order of 10%. This problem has been partially solved by the decrease in of surface and volume of recombination.

In this thesis we will make a Comparative Study of a Schottky Barrier Solar Cell with a GaAs semiconductor and $Al_{1-x}Ga_xAs$ variable bandgap semiconductor, and we'll treat doping effects, BSF layer thickness and the superficial recombination rate S and the gradient of the forbidden band on the results obtained.

Sommaire :

Dédicaces	
Remerciements	
Liste des figures	
Liste des symboles	
Introduction générale	

Chapitre I: Introduction sur la diode Schottky

I.1-Généralité	2
I.2- Eléments de base de la diode Schottky	2
I.2.1- Travail de sortie	2
I.2.2- affinité électronique	3
I.2.3- Etats de surface et interface	4
I.3 Contact Schottky.....	5
I.3.1 Effet Schottky.....	5
a- Définition	5
b- Influence des états d'interfaces.....	6
I.3.2 Diode Schottky.....	7
a- Structure énergétique des bandes.....	8
I.4- paramètre de la diode Schottky.....	12
I.4.1 La hauteur de la barrière	12
I.4.2 Principe du modèle Schottky	13
I.5 Les équations fondamentales de la diode Schottky	14
I.5.1 Extension de la zone de déplétion.....	14
I.5.2 Le champ électrique.....	15
I.5.3 Le potentiel électrique.....	15
I.5.4 La diode SCHOTTKY polarisée en direct.....	16
I.5.5 La diode SCHOTTKY polarisée en inverse.....	16

Chapitre II : la conversion photovoltaïque

II.1-Introduction	18
II.2- Spectre solaire et l'air masse	18
II.2.1 L'air masse.....	19
II.2.2 Spectre solaire	20
II.3 Description de la structure d'une cellule solaire	21
II.4 Absorption et réflexion de la lumière	22
II.5 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire	23
II.6 Mécanismes de génération et de recombinaison des porteurs.....	24
II.6.1 La recombinaison :.....	25
II.6.2 La génération.....	26
II-7 Différents matériaux solaires.....	26
II-8 Nouvelles structures photovoltaïques.....	27
II-8-1 Cellule photovoltaïque conventionnelle.....	27
II-8-2 Cellule à BSF.....	28
II-8-3 Cellule solaire de type Schottky.....	29
II-9 Conclusion	31

Chapitre III : Résultats et discussions.

III-Introduction	33
III.1 La structure métal/SC (GaAs).....	33
III.1.1 Influence du coefficient de transition et de réflexion	33
III.1.2 Influence de niveau de dopage de la couche BSF sur la vitesse de recombinaison superficielle.....	34
III.1.3 Influence de l'épaisseur de la couche BSF sur la vitesse de recombinaison superficielle.....	36
III.1.4 Influence de la recombinaison superficielle sur la concentration des porteurs minoritaires	37
III.1.5 Influence de métal déposé sur la réponse spectrale.....	37
III.1.6 La réponse spectrale	38
III.1.7 Comparaison entre les réponses spectrales.....	40
III.1.8 Influence de dopage de la base sur la réponse spectrale.....	41
III.1.9 caractéristique IV.....	42
III.2 Pour la structure métal/SC(P- Al _x Ga _{1-x} As).....	44
III.2.1 Influence de la fraction molaire sur la réponse spectrale.....	44
III.2.3 Influence de la vitesse de recombinaison sur la réponse spectrale.....	46
III.2.4 Influence de l'épaisseur de la base sur la réponse spectrale.....	47
III.2.5 Caractéristique Courant Tension de la cellule.....	48
III.3 Conclusion générale	49

Listes des figures :

Chapitre I

Figure I – 1 : <i>bande d'énergie du métal</i>	2
Figure I – 2 : <i>bande d'énergie du semi-conducteur</i>	4
Figure I – 3 : <i>Bande d'énergie en présence d'états d'interface</i>	5
Figure I – 4 : <i>charge image avec force image</i>	7
Figure I – 5 : <i>Représentation schématique d'une diode de Schottky non polarisée</i>	8
Figure I – 6 : <i>Structure énergétique des bandes</i>	8
Figure I – 7 : <i>Bande d'énergie dans le cas d'égalité des travaux de sortie</i>	9
Figure I – 8 : <i>Bande d'énergies du Contact Schottky</i>	10

Chapitre II

Figure II – 1 : <i>Définition de l'air masse</i>	20
Figure II – 2 : <i>Radiation spectrale pour différents air masses</i>	21
Figure II – 3 : <i>Structure d'une cellule solaire (N/P)</i>	22
Figure II – 4 : <i>Diagramme d'énergie d'un semi-conducteur</i>	23
Figure II – 5 : <i>Principe de fonctionnement d'une cellule solaire</i>	24
Figure II – 6 : <i>Structure d'une cellule photovoltaïque conventionnelle</i>	28
Figure II – 7 : <i>Diagramme énergétique d'une cellule solaire à couche BSF</i>	28
Figure II – 8 : <i>Structure d'une cellule solaire (métal/SC type N)</i>	29

Chapitre III

Figure III – 1 : <i>variation de coefficient de transition et réflexion En fonction de l'épaisseur de la couche métallique déposée</i>	34
Figure III – 2 : <i>variation de La vitesse de recombinaison superficielle en fonction le dopage de la couche BSF</i>	35
Figure III – 3 : <i>variation de La vitesse de recombinaison superficielle en fonction l'épaisseur de la couche BSF</i>	36
Figure III – 4 : <i>variation de La concentration $_P$ en fonction l'épaisseur de la base</i>	37
Figure III – 5 : <i>Influence de métal déposé sur la réponse spectrale</i>	37
Figure III – 6 : <i>la réponse spectrale de la structure Au/p-GaAs pour $Sp=1.10^6$</i>	39
Figure III – 7 : <i>la réponse spectrale de la structure Au/p-GaAs pour $Sp=2.10^4$</i>	39
Figure III – 8 : <i>la réponse spectrale de la structure Au/p-GaAs et Au/p-GaAs</i>	40
Figure III – 9 : <i>Influence le dopage de la base sur la réponse spectrale</i>	41
Figure III – 10 : <i>caractéristique IV pour la structure Au/n-GaAs et Au/p-GaAs</i>	42
Figure III – 11 : <i>caractéristique IV pour la structure Au/Si et Au/GaAs</i>	43
Figure III – 12 : <i>caractéristique IV pour la structure Al/ GaAs, Ag/GaAs et Au/ GaAs</i>	43
Figure III – 13 : <i>influence de la fraction molaire x sur la réponse spectral</i>	45
Figure III – 14 : <i>influence de la vitesse de recombinaison superficielle</i>	46
Figure III – 15 : <i>influence de l'épaisseur de S/C sur la réponse spectral</i>	47
Figure III – 16 : <i>Caractéristique courant-tension à différentes</i>	48

LISTE DES SYMBOLES

BC	bande de conduction
BV	bande de valence
E	champ électrique (V/cm)
E_C	énergie de la bande de conduction
E_F	énergie de Fermi du métal
E_V	énergie de la bande de valence
E_g	gap ou largeur de bande interdite en eV
I_S	courant de saturation
j	densité de courant
k	constante de Boltzman
N_d	densité de porteur dans le canal
q	charge de l'électron = $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$
T	température
v	vitesse des électrons
V_b	tension de diffusion de la jonction
v_{sat}	vitesse de saturation des électrons ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
W	largeur de la zone de charge d'espace
μ_n	mobilité des électrons ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
μ_p	mobilités des trous ($\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)
μ_0	mobilité électronique en champ faible dans le canal
ϵ_r	permittivité relative
ϵ	constante diélectrique du matériau $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$
ϵ_0	permittivité dans le vide
ξ	énergie
χ	affinité électronique
Φ_{bn}	travail de sortie de la jonction métal-semi conducteur
ϕ_m	travail de sortie du métal
ϕ_s	travail de sortie du semi conducteur

Introduction Généralité :

Dans l'ensemble des matériaux, les semi-conducteurs constituent une classe bien définie, avec des propriétés physiques particulières qui sont sources d'intérêt au plan de la connaissance fondamentale et à celui des applications. Ces deux facteurs indissociables font l'importance de ces matériaux, malgré le nombre limité d'éléments et de composés semi-conducteurs.

Les semiconducteurs interviennent dans presque tous les équipements électriques et optiques. La plus grande partie des composants (transistors, diodes, et ce qu'on appelle puce en générale) sont réalisés en silicium qui joue un rôle prépondérant, sa technologie et sa connaissance théorique ont atteint des niveaux inégalés.

En optoélectronique, les propriétés du silicium sont insuffisantes (mobilités des porteurs relativement petites et transitions électroniques indirectes au seuil d'absorption optique). Dans de telles applications, les composés semi-conducteurs GaAs, GaAlAs sont préférables. Les propriétés de ces matériaux sont très intéressantes pour les performances de ces dispositifs.

Durant les dernières années, les cellules solaires à base de GaAs ont été largement utilisées, plus particulièrement aux applications spatiales, et ce à cause de leur rendement élevé et leur faible dégradation face aux irradiations dans l'espace.

Cependant, un problème important s'opposait au développement des piles solaires au GaAs, à savoir celui de la vitesse de recombinaison en surface. C'est la raison pour laquelle le rendement réalisé pour les premières cellules solaires était seulement de l'ordre de 10%. Ce problème a été résolu partiellement grâce à la croissance d'une couche de $Ga_{1-x}Al_xAs$ sur la surface du GaAs. Les matériaux ayant des paramètres cristallins voisins, peu de défauts et de centres de recombinaison peuvent exister à l'interface entre les deux semi-conducteurs. C'est ainsi que le rendement des cellules au GaAs a dépassé la première fois 20% vers la fin des années 70.

Dans le premier chapitre, nous présenterons une étude sur la diode SCHOTTKY, ainsi que des généralités.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons le schéma de base de la cellule solaire conventionnelle ainsi que les différents phénomènes qui interviennent lors de son absorption du spectre solaire.

Dans le troisième chapitre, nous décrivons les équations de base qui régissent les mécanismes de transports des porteurs dans la cellule solaire à barrière SCHOTTKY.

La description de l'étude comparatif et la représentation des matériaux seront étudiés au quatrième chapitre. Enfin nous présentons au dernier chapitre les résultats obtenus dans cette étude et leurs interprétations.

Chapitre I

Introduction

sur

Le contact

Schottky

1. Généralité:

La structure Metal-semicondeur (M-SC) est le dispositif unipolaire le plus simple, elle est la base d'un grand nombre de structures complexes. Le dispositif est dit unipolaire si un seul type des 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 sur une structure M-SC produit une caractéristique I (V) non symétrique, la structure se comporte comme un redresseur: C'est une diode SCHOTT.

Certains structures M-SC peuvent présenter des caractéristiques I (V) très symétrique, ce sont alors des contacts ohmique est capitale pour réaliser les connections entre les différentes structures d'un circuit électronique. Les structures M-SC sont particulièrement bien adaptées à la technologie de silicium. Elles sont souvent réalisées en ouvrant une fenêtre dans une couche d'oxyde et en déposant sous vide un film métallique qui entre un contact intime avec le semi-conducteur. Il est important tout d'abord de pouvoir situer sur la même échelle. Les énergies des états quantiques dans le métal et semi-conducteur. Le point de repère commun est l'énergie d'un électron immobile à l'infini (c'est le zéro d'énergie de l'atome d'hydrogène) qui s'appelle niveau du vide.[15]

2. Les éléments de base de la diode Schottky:

2.1 Travail de sortie:

Dans un métal on appelle travail de sortie ϕ_M l'énergie à apporter à un électron proche de la surface du solide ; à l'énergie de Fermi E_{FM} ; pour l'arracher au métal et le laisser dans le vide avec une vitesse nulle. En réalité l'énergie d'un électron près de la surface n'est pas la même que celle d'un électron immobile à l'infini car il y a interaction entre les électrons mobiles du métal et cet électron. Ce dernier effet; appelle effet de charge image; est faible et on néglige dans la suite l'électron de conduction est soumis à un ensemble des forces d'interaction dont l'arrivé à la surface de métal ; la compensation des forces d'interaction pour l'extraire un électron du métal ; Il faudra donc lui fournir de l'énergie.

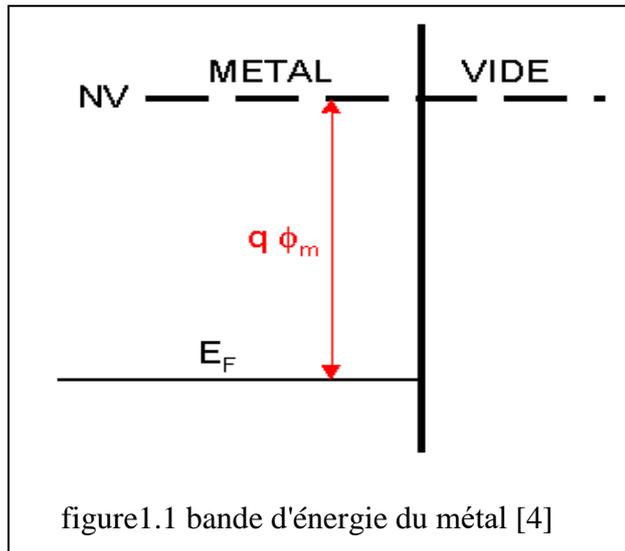
On appelle niveau de vide NV; l'énergie d'un électron extrait du corps et sans vitesse initiale.

C'est l'énergie potentielle de l'électron dans le vide du corps étudié (fig 1-1).[2]

Le travail de sortie d'un métal est donc:

$$\phi_M = NV - E_{FM} \quad (1)$$

C'est une constante qui dépend du métal considéré.



Métaux à fort travail de sortie							Métaux à faible travail de sortie					
Métaux	Cr	Fe	Al	Cu	Ag	Au	Métaux	Li	Na	K	Rb	Cs
T.sortie	4.6	4.4	4.3	4.4	4.3	4.8	T.sortie	2.3	2.3	2.2	2.2	1.8

Tab1: travail de sortie de quelques Métaux

2.2 Affinité électronique:

Dans un semi-conducteur non dégénéré le niveau de Fermi E_{FS} est dans la bande interdite, et il n'y a donc aucun électron à ce niveau.

D'autre part la position de E_{FS} relativement au maximum de la bande de valence E_V et de minimum de la bande de conduction E_C dépend du dopage. Le travail de sortie ϕ_M n'est donc pas une quantité intrinsèque et on lui préfère une autre grandeur intrinsèque celle-là du niveau de Fermi E_{FS} dépend du dopage et ϕ_M n'est pas une constante physique du matériau.

Sauf pour les semi-conducteurs dégénérés; il n'y a pas d'électron au E_{FS} .

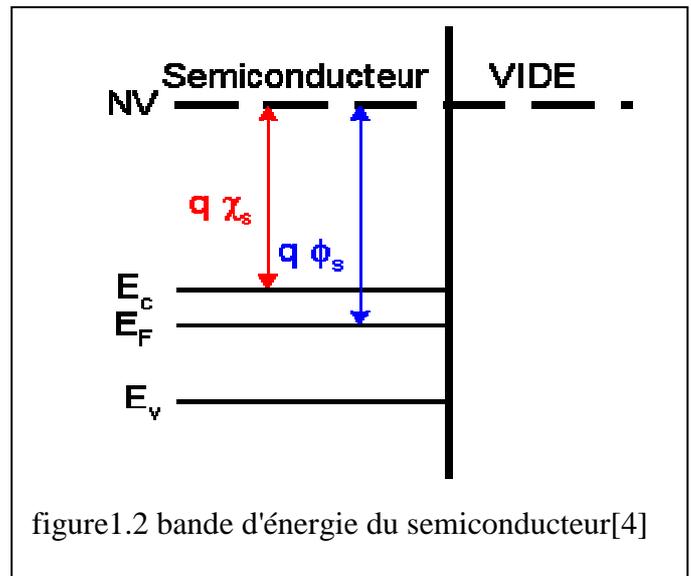
On définit l'affinité électronique comme l'énergie qu'il faut fournir à un électron situé dans le bas de bande de conduction E_C pour l'amener au niveau du vide NV. (Fig 1-2).

$$\chi = N_V - E_C \quad (2)$$

Cette grandeur est constante physique du semi-conducteur.

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

Tab2: Affinité électronique de quelque Semi-conducteur



2.3 Etats de surface et interface:

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

En volume, chaque atome établit des liaisons avec chacun de ses proches voisins. En surface l'atome n'établit de liaison que dans un demi-plan il reste coté vide ce que l'on a coutume d'appeler des 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 semi-conducteur. On dit alors qu'il existe à la surface du semi-conducteur une couche d'oxyde natif.

La présence d'une part d'atomes étrangers et d'autre part de distorsions du réseau ; résultant de la différence de maille entre le semi-conducteur et son oxyde, entraînent l'existence d'états de la surface extrinsèque. (Fig 1.3)

En fin, si on considère l'interface entre deux matériaux au niveau d'une hétéro structure le réseau passe sur une distance de quelque angström de la périodicité d'un matériau à celle de l'autre. Il en résulte des états électroniques différents de ceux de chacun des matériaux se sont des états d'interfaces.[3]

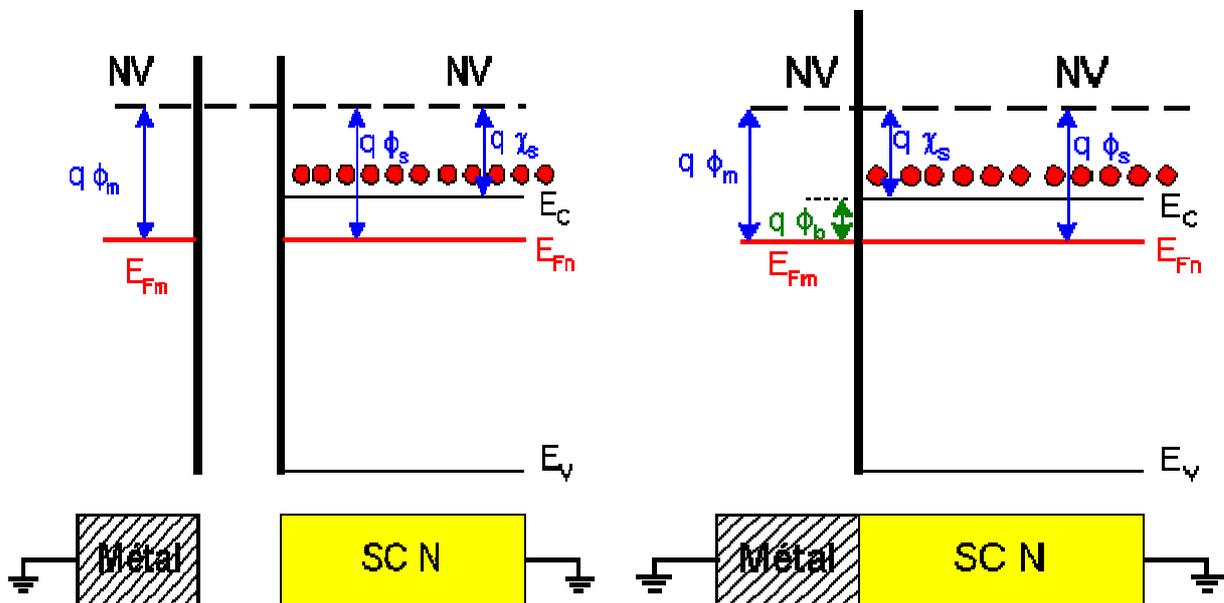


Figure 1.3 Bande d'énergie en présence d'états d'interface [14].

3. Le contact Schottky:

3.1 L'effet Schottky:

a. Définition:

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 (e) située à la distance (-x) dans les matériaux. Cette charge est appelée charge image, la force qui en résulte est la force image et le potentiel qui dérive de cette force est le potentiel image (fig1.4.A).

La force image est donnée par:

$$F = (1/4\pi\epsilon_0).e^2 / 4X^2 \quad (3)$$

ε_0 : Permittivité du vide.

Le travail nécessaire pour amener l'électron de l'infini à sa position (x) de matériau est donné par:

$$\int_x^{\infty} F dx = e^2 / 16\pi\varepsilon_0 X \quad (4)$$

L'électron extrait du matériau ne passe donc pas brutalement à une énergie potentielle nulle, mais évolue progressivement vers une énergie potentielle nulle 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 arrivé à l'infini.

A la distance (x) du matériau l'énergie potentielle est égale au travail, changé de signe, qu'il faut fournir pour l'amener à l'infini [4]:

$$W(X) = -e^2 / 16\pi\varepsilon_0 X \quad (5)$$

L'énergie potentielle de l'électron situé à la distance x de conducteur est égale à travail nécessaire pour l'amener à ce point avec signe moins.

b. Influence des états d'interfaces:

En pratique, la rupture de la périodicité cristalline tridimensionnelle du cristal semi-conducteur en sa surface donne naissance à une forte densité de niveaux permis dans la bande interdite à la surface. Ces niveaux permis sont appelés états d'interface et possèdent des énergies variant de E_C à E_V . Ces états sont peuplés des électrons s'ils se trouvent sous le niveau de Fermi. Considérons le semi-conducteur avant le contact avec le métal. Les électrons piégés dans les états d'interface proviennent du semi-conducteur avoisinant, dans lequel est créée une zone de déplétion. En note à la surface du semi-conducteur:

$$eV_0 = E_F - E_V \quad (6)$$

Mettons à présent le métal en contact avec le semi-conducteur. Précédemment, en l'absence d'états d'interface, l'alignement des niveaux de Fermi s'obtenait par transfert d'électrons du semi-conducteur vers le métal. Il en résultait une déplétion des électrons près de la surface. Si on considère une densité d'états d'interface très élevée, un accroissement infinitésimal de la courbure des bandes vers le haut revient à faire passer un grand nombre des états d'interfaces (ceux se trouvant entre $E_F - \delta E$ et E_F) au-dessus de niveau de Fermi.

$$(E_F - \delta E \text{ et } E_F) \quad (7)$$

En conséquence l'alignement des niveaux de Fermi ce fait par transfert d'électrons d'interface vers le métal, Ce qui s'accompagne d'une modification infinitésimale (et non négligeable) de la courbure des bandes.[5]

En conséquence, la barrière de potentiel est donnée. Par l'expression suivante:

$$eV_b = E_g - eV_0 \quad (8)$$

En pratique, la densité d'état, d'interface est suffisamment grande pour que la barrière de potentiel se situe entre la valeur (le l'équation (7) et celle de l'équation (8):

$$eV_b = \phi_M - \chi \quad (9)$$

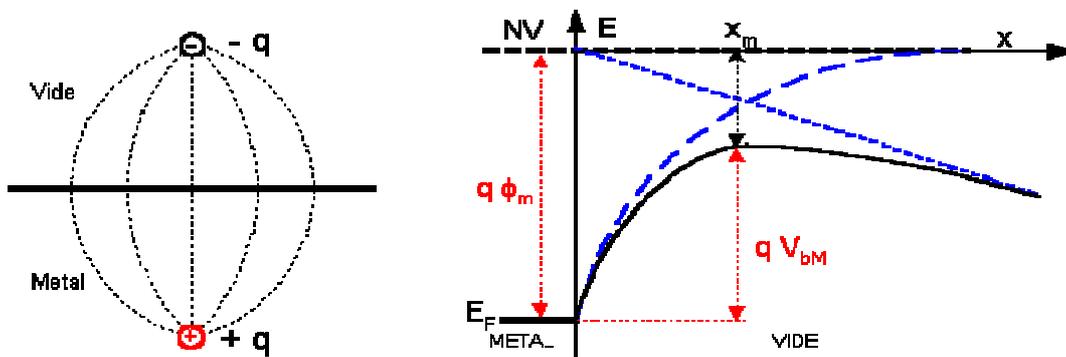


Figure 1.4.A:charge image avec force image

B- effets cumulés de la force image et du champ électrique sur la barrière de potentiel [9].

3.2 Diode Schottky:

Un contact M-SC de type redresseur est appelé contact Schottky si l'épaisseur de la zone de charge d'espace est plus grande.

Ce type découvert par F.Brain en 1874, il est expliqué plus tard par Schottky et Mott.[6]

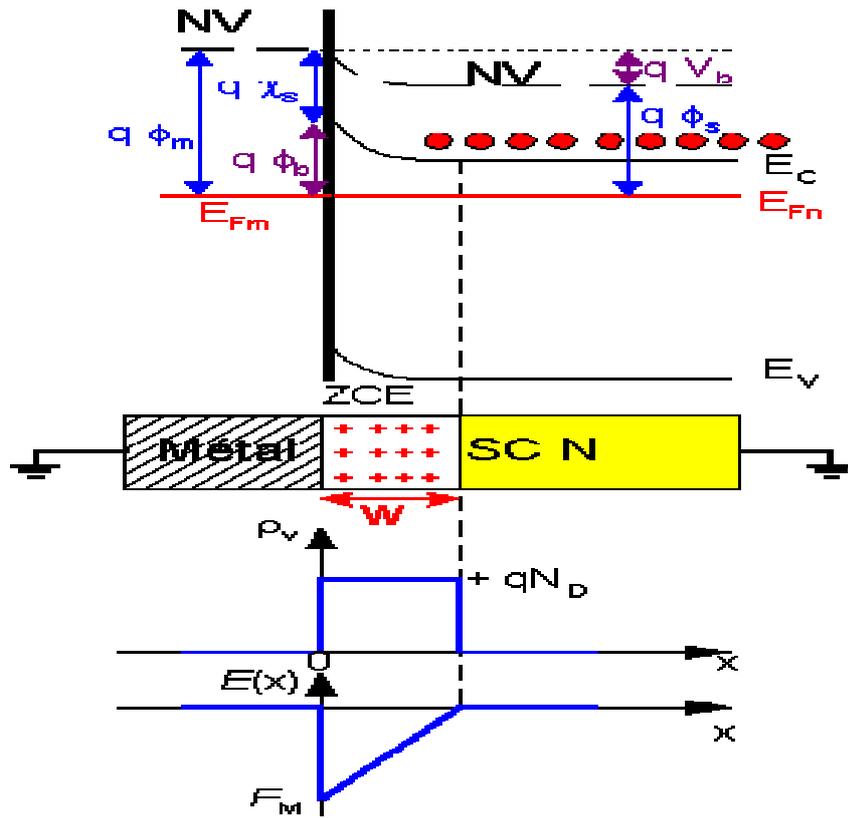


Figure 1. 5 Représentation schématique d’une diode de Schottky non polarisée [1]

a. Structure énergétique des bandes:

Lorsqu’un métal et un semi-conducteur sont au contact il existe à l’interface une barrière de potentiel donnée par l’expression (8). La structure des bandes au voisinage de l’ interface est conditionnée par la différence éventuelle des travaux de sortie du métal et du semi-conducteur.

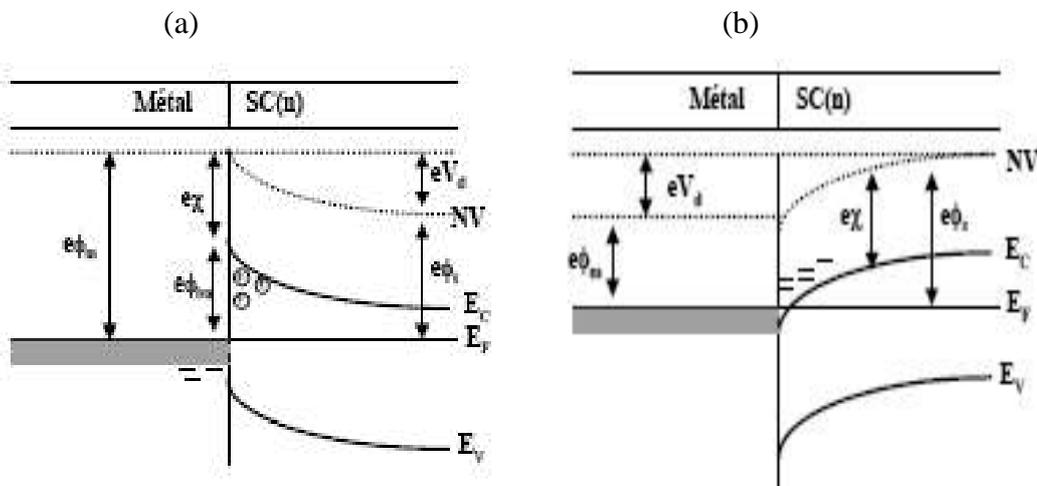


Figure 1. 6 Structure énergétique des bandes de contact métal avec [5]

a) Semiconducteur type n. b) Semiconducteur type p.

a.1 Le premier cas: $\Phi_M = \Phi_{SC}$

Lorsque le métal et le semi-conducteur sont mis au contact, ils peuvent échanger d'énergie et constituent un seul système, ils sont représentés par un niveau de Fermi unique puisque les niveaux sont alignés.

La mesure des ces niveaux sont alignés en absence de contact. de sorte que l'équilibre thermodynamique est réalisé sans aucun échange d'électron.

Le diagramme énergétique est représenté sur la figure 1.7. La barrière de potentiel eV_b s'établit au niveau de l'interface, les bandes sont horizontales. On dit que le système est en régime des bandes plates. Le diagramme énergétique est valable quel que soit le type du semi-conducteur.

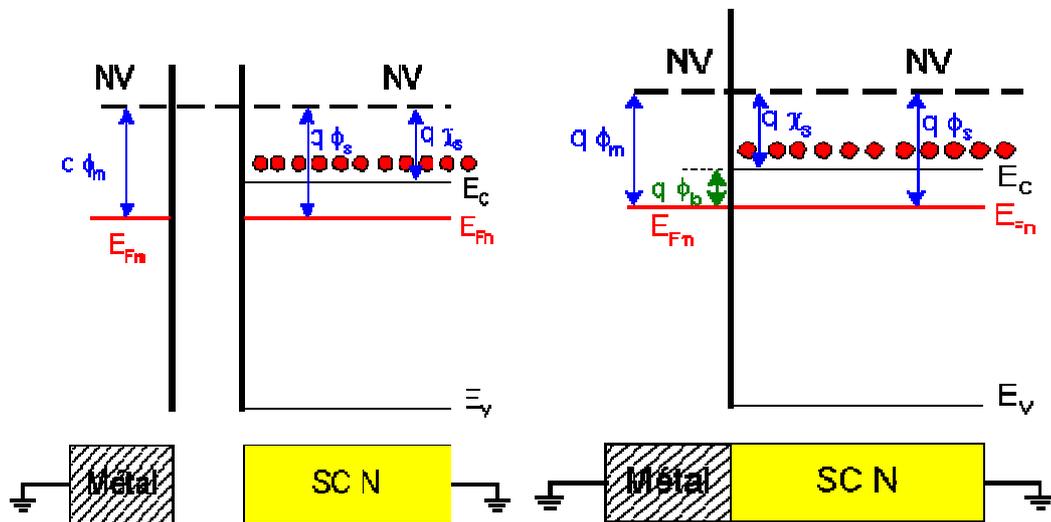


Figure 1.7 Bande d'énergie dans le cas d'égalité des travaux de sortie [8].

a.2 Le deuxième cas: $\Phi_M < \Phi_{SC}$

Lorsque les deux matériaux sont unis au contact, le travail de sortie du métal étant inférieur à celui du semi-conducteur, les électrons sortent du métal pour entrer dans le semi-conducteur. Le système évolue jusqu'à l'alignement des niveaux de Fermi.

- **Semi-conducteur type n:**

Les électrons qui passent du métal dans le semi-conducteur font apparaître dans le métal un déficit d'électrons localisé à la surface, et dans le semi-conducteur une zone d'accumulation très peu étalée. Il en résulte une courbure vers le bas des bandes de valence et de conduction le contact est ohmique (Figure 1.6).

- **Semi-conducteur type p:**

Les électrons passent du métal dans le semi-conducteur. Il apparaît un déficit d'électrons qui viennent du métal se recombinent avec les trous créant une zone de déplétion due à la présence des ions N' qui ne sont plus compensés par les trous. Il apparaît ainsi une zone de charge d'espace étalée dans le semi-conducteur. Le système évolue jusqu'à moment où le champ et la tension de diffusion résultante arrêtent la diffusion des électrons le contact est redresseur c'est une diode Schottky[9].

a.3 Le deuxième cas: $\Phi_M > \Phi_{SC}$

Lorsque les deux matériaux sont mis au contact, le travail de sortie du semi-conducteur étant inférieur à celui du métal, les électrons passent du semi-conducteur dans le métal. Le système se stabilise à un régime d'équilibre défini par l'alignement des niveaux de Fermi. Dans ce cas le diagramme énergétique est différent suivant le type du semi-conducteur (fig 1.8 A).

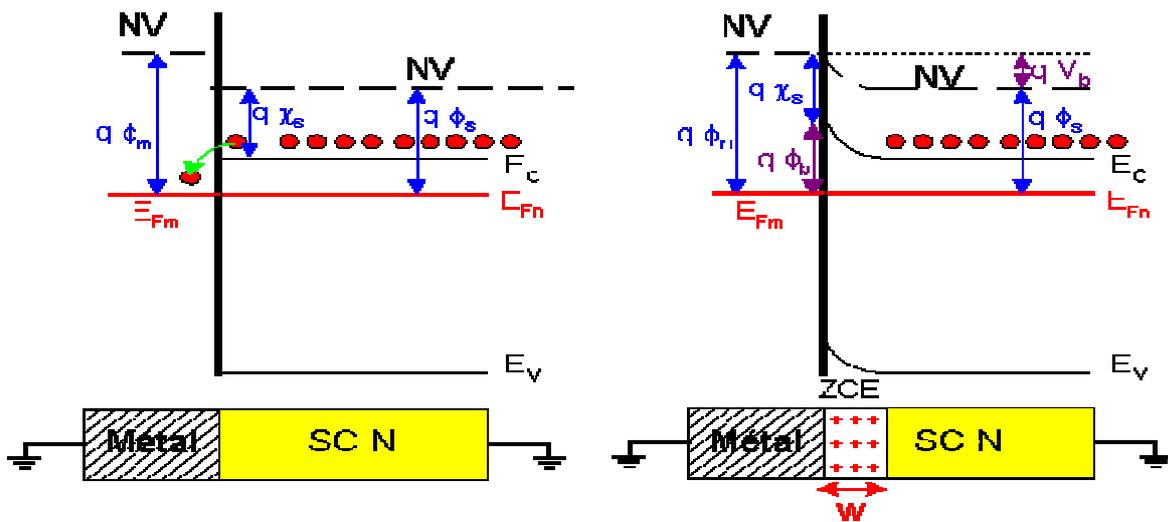


Figure 1.8 Bande d'énergies du Contact Schottky [3]

- **Semi-conducteur type n:**

Les électrons qui passent du semi-conducteur vers le métal entraînent des modifications énergétiques dans chacun des matériaux dans le semi-conducteur, une zone de déplétion se crée, les ions donneurs ionisés N_d ne sont plus compensés par les électrons, il apparaît une charge d'espace positive.

D'autre part la distance entre la bande de conduction et le niveau de Fermi, qui traduit la population électronique est plus grande au voisinage de l'interface que dans la région neutre du semi-conducteur. Le niveau de Fermi étant horizontal : il en résulte une

courbure des bandes vers le haut. Dans le métal ; il apparaît une accumulation d'électron à l'interface.

Cette double charge d'espace est associée un champ électrique et une tension de diffusion V_d comme dans le cas de jonction PN ; équilibre les forces de diffusions et déterminent l'état d'équilibre. Notons que le nombre des charges positives développées dans le semi-conducteur est égal au nombre des charges négatives développées dans le métal.

Ces charges sont des charges d'accumulation, la densité d'état dans le métal de l'ordre de 10^{22}cm^{-3} .

Elles sont développées à la surface du métal. Dans le semi-conducteur ces charges sont des charges de déplétion où des ions donneurs avec une densité de l'ordre de 10^{16} à 10^{18}cm^{-3} . Cette charge d'espace est relativement étalée à l'intérieur du semi-conducteur ce qui entraîne une extension des courbures de bandes.

La structure ici constitue donc un contact redresseur (Diode Schottky).

- **Semi-conducteur type p:**

A la mise en contact, les électrons diffusent du semi-conducteur vers le métal jusqu'à alignement des niveaux de Fermi. il apparaît une zone de charge d'espace négative dans le métal, positive dans le semi-conducteur. Cette charge d'espace est accompagnée d'une courbure vers le haut des bandes de valence et de conduction. La charge d'espace dans le métal est une accumulation d'électrons à la surface. Considérons la charge d'espace positive, développée dans le semi-conducteur, ces charges libres qui vont s'accumuler à la surface du semi-conducteur. En fait si la concentration des électrons dans la bande de conduction de métal est de l'ordre de 10^{22}cm^{-3} .

La concentration équivalente dans la bande de valence du semi-conducteur à la température ambiante est de l'ordre de 10^{19}cm^{-3} . Il en résultant un étalement de la charge d'espace dans le semi-conducteur beaucoup plus important que dans le métal. Toutefois cet étalement reste beaucoup plus faible que dans la structure précédente où les charges positives étaient des charges fixes, due aux ions donneurs avec concentration de l'ordre de 10^{16} à 10^{18}cm^{-3} .

La différence essentielle réside dans le fait que la charge d'espace dans le semi-conducteur correspond à un régime d'accumulation. Il en résulte qu'il n'existe pas de zone de vide de porteurs, donc isolante, à l'interface.

Ainsi lorsqu'on polarise cette structure la tension appliquée n'est plus localisée dans le cas précédant, mais distribuée dans tout le semi-conducteur, plus résistif que le reste de la structure. Au niveau de l'interface, l'arrivée ou le départ d'un trou dans le semi-conducteur est immédiatement composé par l'arrivée où le départ d'un électron dans le métal, il en résulte que le courant circule librement dans les deux sens au niveau du contact, le contact est ohmique.

4. Paramètres de la diode Schottky:

4.1 La hauteur de la barrière:

* Pour le flux d'électron qui va du semi-conducteur dans le métal, la hauteur de barrière prévue par le modèle de Schottky vaut:

$$eV_b = \phi_M - \phi_{s/c} \quad (10)$$

C'est la différence des travaux d'extractions; pour le flux inverse des électrons du métal vers la bande de conduction du semi-conducteur, la hauteur de barrière vaut

$$eV_{bp} = \phi_M - \chi \quad (11)$$

C'est la différence entre le travail d'extraction de métal et électronique du semi-conducteur.

* Le modèle de Schottky traite le contact idéal entre un semi-conducteur de type p et un métal de la manière équivalente. Le niveau du Fermi est dans la partie inférieure de la bande interdite de sorte que le travail d'extraction du métal ϕ_M est inférieur à celle du semi-conducteur. Les pliages des bandes se manifestent vers le bas. La hauteur de barrière pour les porteurs majoritaires vaut:

$$eV_{bp} = E_g - (\phi_M - \chi) \quad (12)$$

Tel que E_g : est la largeur de la bande d'énergie interdite.

Le modèle prédit donc que pour un semi-conducteur précis et pour tout métal, la somme des hauteurs de barrière sur un substrat dopé de type respectivement n et p est égale à la largeur de bande interdite:

$$e(V_{bn} - V_{bp}) = E_g \quad (13)$$

En pratique; l'existence d'états de surface qui agissent en tant que donneurs ou accepteurs modifie la valeur de la hauteur de barrière calculée à l'aide de l'expression (12) ; le modèle Schottky sous estime la hauteur de barrière du semi-conducteur dopé le type n et surestime celle du semi-conducteur dopé de type p. Cependant, la somme des deux hauteurs de barrière reste environ égale à la largeur de la bande interdite conformément au résultat (13). Sans préjuger sur la valeur exacte de la hauteur de barrière, le modèle de Schottky de la jonction M-SC est traité dans la suite; ses résultats peuvent être adaptés compte tenu de l'influence d'états électroniques discrets à l'interface entre le métal et semi-conducteur. [8]

4.2 Principe du modèle Schottky:

Les prédictions de modèle Schottky sont difficiles à évaluer à cause des difficultés expérimentales de mesurer des travaux de sortie des métaux et des semi-conducteurs, lorsqu'un électron est émis à la surface d'un corps solide, une force de rétention se manifeste. Cette force est équivalente à celle d'une force image qui dérive d'un potentiel image. La description de cette force est un sujet classique de l'électrodynamique et des conditions de continuité à l'interface.

En outre, une mesure de travail d'extraction nécessite l'application d'un champ électrique à l'extérieur de la surface du solide dont l'intensité décroît linéairement lorsqu'on s'éloigne de la surface. Qualitativement, la variation d'énergie électrostatique d'un électron en fonction de son éloignement de la surface du métal permet d'évaluer le travail d'extraction.

Sous l'action conjuguée de potentielle image et du champ électrique, le travail d'extraction observé V_b est réduit. Cette situation se retrouve dans une hétéro-jonction. La barrière établie à l'interface est réduite sous l'effet de potentielle image et du champ électrique.

Dans une jonction M-SC sous tension le courant électrique est essentiellement dû au transport de charge effectué par les porteurs majoritaires. Ce fonctionnement contraste notamment avec les minoritaires. Dans une diode Schottky standard (dopage du Si type n $N_d=10^{23} \text{ m}^{-3}$).

A température ambiante, le mécanisme de transport dominant est celui de l'émission thermoïonique des porteurs majoritaires du semi-conducteur dans le métal.

En situation d'équilibre, les courants partiels d'électrons du semi-conducteur dans le métal et inversement du métal dans le semi-conducteur s'équilibrent. Ces courants sont proportionnels au nombre volumique des porteurs à l'interface.

En effet, dans la partie homogène du semi-conducteur, par analogie aux expressions le nombre de porteurs vaut:

$$N_n = n_i \exp(-eV_0/kT) = N_d \quad (14)$$

Alors qu'à l'interface:

$$N_s = n_i \exp[-e(V_b - V_0)/kT] = N_d \exp(-eV_b/kT) \quad (15)$$

L'application d'une différence de potentiel V dans le sens direct se développe principalement dans la zone de charge d'espace à résistance plus élevée. Elle réduit la barrière de potentiel à travers la jonction. Le nombre volumique des électrons à l'interface augmente [14].

$$N_s = N_d \exp[-e(V_b - V)/kT] \quad (16)$$

5. Les équations fondamentales de la diode Schottky:

Les porteurs franchissent la barrière de potentiel entre le métal et le semi-conducteur par émission thermoïonique. Ce processus est active par l'énergie thermique due à la température à laquelle la barrière de potentiel soit nettement supérieure à (kT/e) ; il existe une probabilité non nulle pour certains porteurs aient une énergie supérieure à la barrière de potentiel et puissent la franchir.

5.1 Extension de la zone de déplétion:

Dans la mise de contact Schottky ; on obtient la distribution de potentiel dans la zone de charge d'espace en intégrant l'équation du Poisson. Nous supposons que le semi-conducteur est homogène avec une densité de donneurs excédentaires $(N_d - N_a)$ dans le semi-conducteur type n et l'inverse dans le type p. Nous admettrons que tous les donneurs sont ionisés à la température ambiante et que la densité d'états d'interface est négligeable. Nous supposons que la zone de charge d'espace est vide de porteurs, dans ce cas ; la densité de charge dans le semi-conducteur s'écrit:

$$\rho(x) = en_0 - en_0 \exp(-eV(x)/kT) \quad (17)$$

La quantité d'électron qui on peut surmonter la barrière $V(x)$ pour $x < w$; où w est la largeur de la zone de déplétion, vaut:

$$n = n_0 \exp(-eV(x)/kT) \quad (18)$$

Pour $x \geq w$ on a $n_0 = N_d^+ = N_d$ on revenant où relation (17) et puisque $[eV(x)] \ll kT$,

$$\rho(x) = en_0 = eN_d \quad (19)$$

5.2 Le champ électrique:

Pour calculer le champ électrique $E(x)$ dans la jonction Schottky on fait la résolution de l'équation de Poisson:

$$\partial^2 V(X) / \partial X^2 + eN_d / \epsilon_r \epsilon_0 = 0 \quad (20)$$

ϵ_0 : Permittivité relative du semi-conducteur

ϵ_r : Permittivité de vide.

On intégrant l'équation (19) avec les conditions aux limites

$$V(x) = 0 \text{ et } E(X) = -\partial V(X) / \partial X \Big|_{x=w} = 0 \quad (21)$$

On trouve:

$$V(x) = (-eN_d(w-x)^2 / \epsilon_0 \epsilon_r) + A(w-x) + B \quad (22)$$

Alors:

$$V(x) = eN_d(w-x)^2 / 2 \epsilon_0 \epsilon_r \quad (23)$$

$$E(x) = -\partial V(x) / \partial x \Rightarrow E(x) = eN_d(w-x) / \epsilon_0 \epsilon_r \quad (24)$$

Le champ électrique à l'interface métallurgique $x=0$

$$E = eN_d w / \epsilon_0 \epsilon_r \quad (25)$$

5.3 Le potentiel électrique:

En intégrant une deuxième fois l'équation (24) en prenant l'origine des potentiels à l'interface, on obtient l'équation (23). La tension de diffusion résulte de la différence

$$eV_b = \phi_M - \phi_{s/c} \quad (26)$$

Cette tension correspond à la différence de potentiel entre la surface du semi-conducteur et son volume, c'est-à-dire aux bornes de la zone de charge d'espace.

$$e[V(w) - V(0)] = (\phi_M - \phi_{s/c}) \quad (27)$$

$$e[0 + ew^2 N_d / 2 \epsilon_0 \epsilon_r] = e^2 N_d w^2 / 2 \epsilon_0 \epsilon_r \quad (28)$$

D'où l'expression de la largeur de la zone de charge d'espace à l'équilibre:

$$w = [2 \epsilon_0 \epsilon_r V_d / e N_d]^{1/2} \quad (29)$$

La charge est accumulée pour une section de surface d'unité dans cette région et égale à [8]:

$$Q_{sc} = e w N_d = [2 \epsilon_0 \epsilon_r N_d (\phi_M - \phi_{s/c})] \quad (30)$$

5.4 La diode SCHOTTKY polarisée en direct:

Appliquons sur le métal une tension $V_j > 0$ par rapport au semi-conducteur.

Le Niveau de FERMI du métal va "descendre" de qV_j par rapport au niveau de FERMI du semi-conducteur (potentiel $V_j > 0$ appliqué sur 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 :

$$qV'_b = qV_b - qV_j$$

5.5 La diode SCHOTTKY polarisée en inverse:

On porte le métal à un potentiel inférieur à celui du semi-conducteur ($V_j < 0$) : Le Niveau de FERMI du métal va "monter" de qV_j par rapport au niveau de FERMI du semi-conducteur (potentiel $V_j < 0$ appliqué sur 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 :

$$qV'_b = qV_b - qV_j$$

Le contact Métal-semiconducteur est le premier dispositif à être mis en pratique. Ainsi, il est possible d'obtenir avec la jonction M-SC. La compréhension des propriétés de cette jonction est un problème qui se pose dès que l'on fait des contacts sur un semiconducteur. L'hétérojonction métal-semiconducteur est la base de fonctionnement de nombre des dispositifs (nous le verrons très rapidement pour le contact ohmique).

Les deux objectifs à atteindre pour obtenir un composant Schottky performant sont les suivants:

- * Bloquer la conduction jusqu'à des tensions relativement élevées d'où l'utilisation d'une barrière de potentiel.
- * Non-linéarité de capacité importante que nous obtiendrons par la modulation spatiale avec la tension d'une zone désertée.

Chapitre II
La conversion

Photovoltaïque

II-1 Introduction :

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

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

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

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

- L'absorption de la lumière dans le matériau.
- Génération des paires électron-trou.
- Diffusion des porteurs minoritaire.
- La collecte des charges.

Il est donc clair qu'un matériau doit avoir des propriétés optiques et électriques spécifiques pour permettre la conversion η photovoltaïque. Jusqu'à l'année 1976, époque où les premières jonctions ont vu le jour, le principal matériau à utilisation photovoltaïque était le Silicium monocristallin. Les Jonctions réalisées grâce à ce matériau permettent en effet de transformer les photons en un courant électrique avec des rendements de conversion η qui sont à l'heure actuelle, de l'ordre de 15% au niveau industriel, mais qui ont atteint 20% dans le laboratoire. Comme le Silicium monocristallin, des composés tels que le GaAs ont abouti à des rendements assez importants (plus qu'un quart de la puissance incidente est convertie par des cellules à base de GaAs, ainsi que des rendements de plus de 30% ont été obtenus grâce à des cellules multi-jonctions (tandems solaires) [18].

II-2 Spectre solaire et l'air masse :

Le soleil est une étoile de forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1391000Km. Il est situé à une distance moyenne de 149598000Km de la terre.

Composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 10^7 K [19].

L'énergie radiative provient du soleil est à cause des réactions de fusion nucléaire au cœur de cette étoile. A chaque seconde une énorme quantité de masse (6.10^{11} Kg) de l'hydrogène (H_2) est convertie en Hélium (H_e), avec une perte de masse nette environ de 4.10^3 Kg, ce qui est équivalent à 4.10^{20} j d'après la relation d'Einstein ($E = mc^2$). Cette énergie est émise principalement en tant que rayonnement électromagnétique dans une large gamme s'étalent de l'ultraviolet à l'infrarouge et même dans les ondes radio [19,20].

L'énergie lumineuse dite « extraterrestre » c'est à dire hors atmosphère a été évaluée avec précision par la NASA et vaut $1367w/m^2$. Il s'agit de l'irradiance reçue, ou rayonnement solaire instantané à un instant donné au dessus de l'atmosphère terrestre, en incidence normale (c'est à dire sur un plan perpendiculaire à la direction du soleil). On appelle cette valeur « constante » solaire mais elle ne l'est pas tout à fait à cause des légères variations de la distance terre-soleil.

Cette énergie qui descend en ligne droite vers notre planète ne peut pas nous parvenir sur la terre en intégralité car elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère par absorption et par diffusion.

En effet l'atmosphère contient on le sait, une majorité d'azote et d'oxygène (respectivement 78% et 21%), mais aussi de l'argon. Du CO_2 , de la vapeur d'eau, et la fameuse couche d'ozone de la stratosphère. Dont le rôle de filtrage des UV les plus durs est si important. Les poussières et les nuages ont aussi leur importance dans la diffusion du rayonnement solaire. Le degré auquel l'atmosphère affecté la lumière du soleil reçu sur la surface de la terre est traduit par plusieurs « air mass », et l'angle entre le rayonnement provenant du soleil et le zénith définit l'air masse [19,20].

II-2-1 L'air masse:

L'intensité lumineuse issue du soleil normalement incidente sur la surface de la Terre est appelée la constante solaire. Cette constante est approximativement d'une valeur de $1,4$ kW/m² au-dessus de la couche atmosphérique et est réduite sur Terre à 1 kW/m² par réflexion et absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique. Cette perte est appelée la « masse d'air » (AM). La désignation AM0 correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au-dessus de notre atmosphère à incidence normale. Le titre AM1 correspond lui à une même lumière arrivant à la surface terrestre. L'appellation AM1.5 désigne la masse d'air rencontrée pour la lumière arrivant à 48.2° sur la surface de la Terre, soit une lumière plus faible du fait que l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée est plus grande (figure II-1).

De manière générale, l'indice m associée à la masse d'air (AM m) est calculé comme suit : $m \approx 1 / \sin(A)$. A étant l'angle entre l'incidence des rayons lumineux et horizontale à la terre.

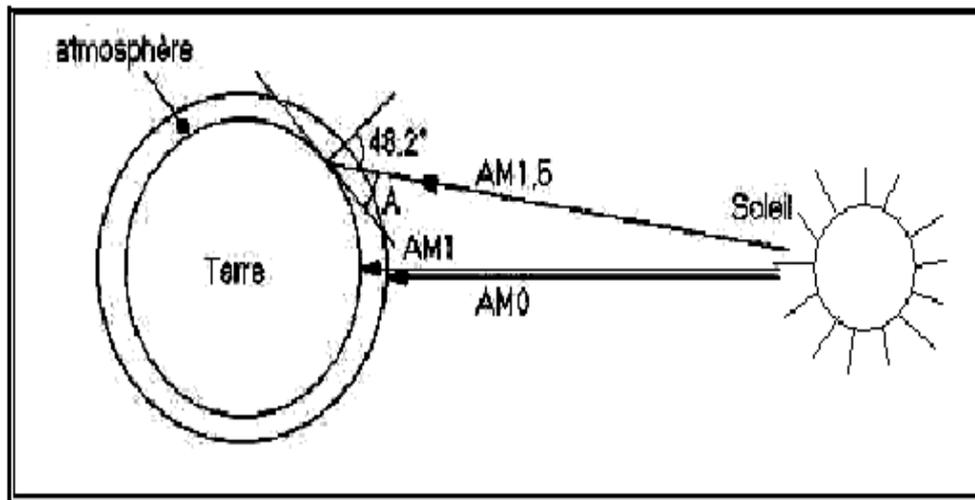


Figure II-1 Définition de l'air masse.

II-2-2 Spectre solaire :

Le spectre du soleil c'est sa décomposition en longueurs d'onde. La lumière solaire est en effet composée de toutes sortes de rayonnements de couleurs différentes, caractérisées par leur gamme de longueur d'onde. Les photons, grains de lumière qui composent ce rayonnement électromagnétique, sont porteurs d'une énergie qui est reliée à leur longueur d'onde.

Où h est la constante de Planck, ν : la fréquence, c : la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde.

C'est cette relation mise à jour par Planck en 1900 qui a confirmé la nature à la fois corpusculaire et ondulatoire de la lumière : présence de corpuscules - les photons - et propagation d'ondes avec une fréquence de vibration et une longueur d'onde.

Une courbe standard de la répartition spéciale du rayonnement solaire extraterrestre, compilée selon les données recueillies par les satellites est désignée sous le nom de AMO. Sa distribution en énergie est répartie comme suit :

Ultraviolet UV	$0,20 < \lambda < 0,38 \mu\text{m}$	6,4%
Visible	$0,38 < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$	48%
Infra- Rouge IR	$0,78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$	45,6%

La (figure II-2) montre quatre courbes liées à la radiation spectrale solaire qui est la puissance par unité de superficie par unité de longueur d'onde. La courbe supérieure qui représente le spectre solaire en dehors de l'atmosphère de la terre, est l'état de la masse d'air zéro (AMO) ; sa puissance vaut 1367 w/m^2 , cette condition peut être simulée par un corps noir à 5800k , montrée par la courbe en pointillée. Le spectre AMO est utilisé pour les applications (satellites et véhicules spatiaux). Le spectre AM1 représente la lumière du soleil sur la surface de la terre quand le soleil est au zénith, la puissance d'incidence est

environ 925 w/m^2 . Le spectre AM2 est obtenu pour un angle de 60° et à une puissance d'environ 691 w/m^2 . L'air masse AM 1,5 est défini par l'angle 48.2° , au dessus de l'horizon et une intensité de 844 w/m^2 , cet air masse est approprié par des applications terrestres.

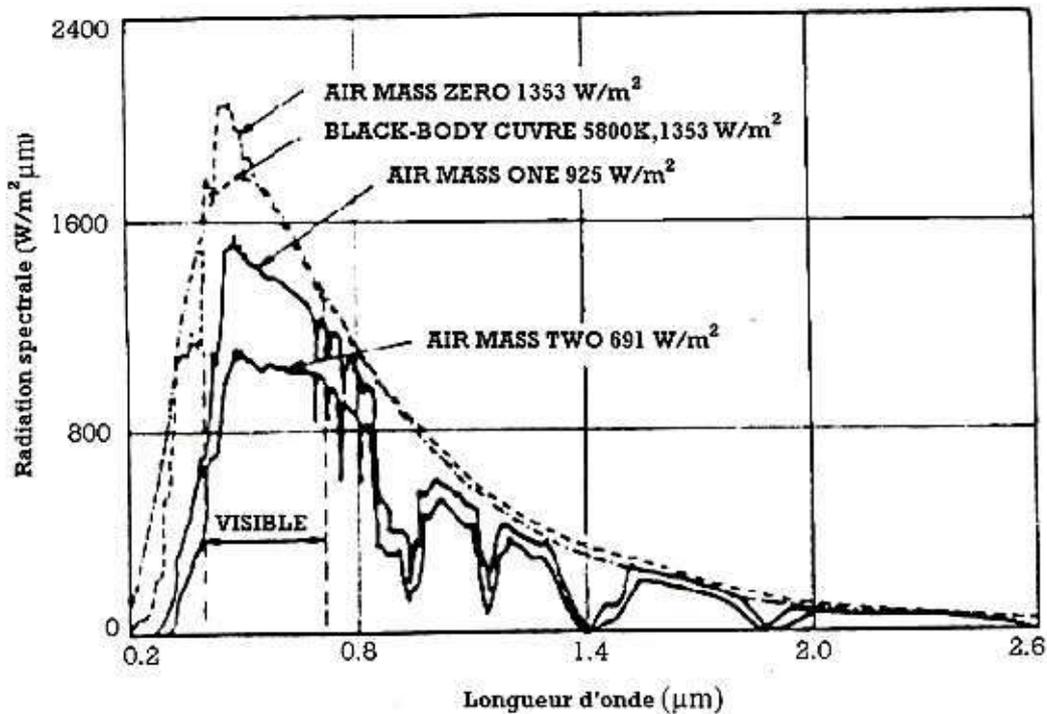


Figure II-2 Radiation spectrale pour différents air masses [20].

II-3 Description de la structure d'une cellule solaire :

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

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

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

La structure simple d'une cellule solaire est représentée dans la figure II-3.

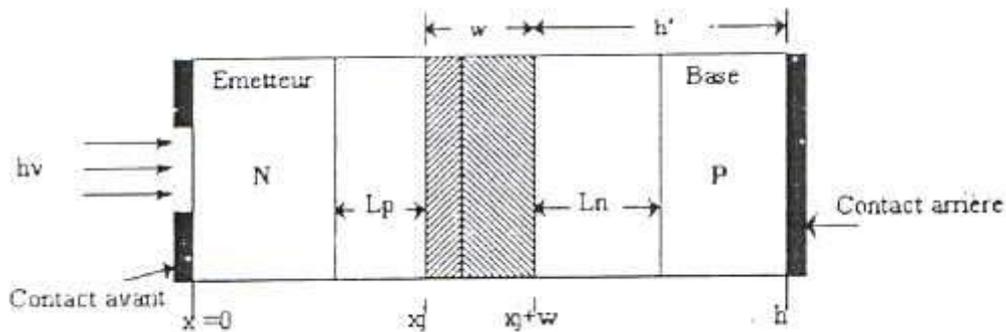


Figure II-3 Structure d'une cellule solaire (N/P) [20]

II-4 Absorption et réflexion de la lumière :

L'absorption de la lumière par le matériau solaire étant sans doute le mécanisme principal du phénomène de la génération, la majorité des semi-conducteurs de base des cellules solaire absorbe convenablement le spectre visible. En effet, on utilise toujours les semi-conducteurs ayant un coefficient d'absorption élevé.

Lorsqu'un flux solaire (Φ) atteint la surface avant de la cellule, en supposant que la partie transmise et non absorbée est ($T\Phi$), si on affecte la quantité ($R\Phi$) à la partie réfléchie aux niveaux de la surface, alors la partie qui reste ($(1-T-R)\Phi$) est complètement absorbée dans le volume du matériau.

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

L'absorption n'a lieu que si l'énergie de ces photons est égale ou est supérieure à l'énergie de la bande interdite du semi-conducteur E_g . Les photons qui ne satisfont pas cette condition ($E_{ph} < E_g$) ne seront pas absorbés et ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque. Que se passe-t-il s'il y a une énergie supérieure à E_g ? Le photon 2 du diagramme II-4-b génère une paire électron-trou à un niveau supérieur, mais l'excédent est perdu par un processus de désexcitation spontané qui produit de la chaleur et ramène son énergie à E_g . Donc quelle que soit son énergie, pourvu qu'elle soit supérieure à E_g , chaque photon absorbé ne crée qu'une seule paire électron-trou [19].

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

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

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

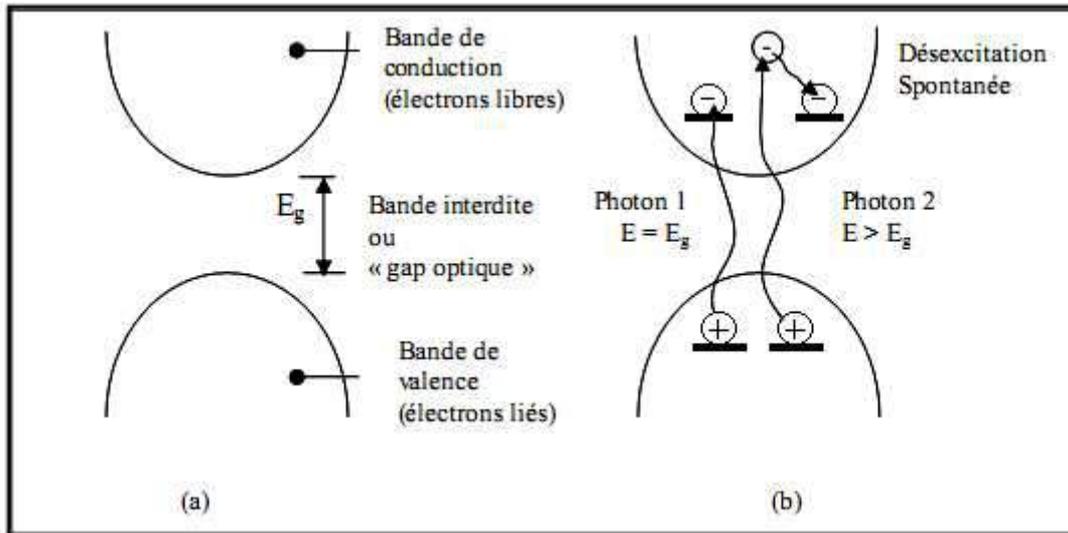


Figure II-4 Diagramme d'énergie d'un semi-conducteur

a)- Dans l'obscurité. b)- Sous illumination.

II-5 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire à jonction P-N :

Une cellule solaire se compose d'un certain nombre de couches, généralement deux couches principales, l'une est constitué d'un semi-conducteur de type N et l'autre de type P et inversement. C'est à la jonction ou interface métallurgique de ces deux couches que la cellule produit de l'électricité, celle ci est un élément très important dans l'optoélectronique [22]. Ces semi-conducteurs sont des matériaux électroniques spéciaux, sensibles à la lumière, ayant deux propriétés principales pour produire l'électricité :

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

Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire est illustré sur la figure (II-5).

Les photons incidents créent des porteurs dans chacune des régions 1,2 et 3.

Le comportement de ces porteurs libres diffère suivant le lieu de leur création.

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

Ces deux contributions s'ajoutent pour créer un photo-courant résultant J_{ph} qui contribue au courant inverse de la diode [3].

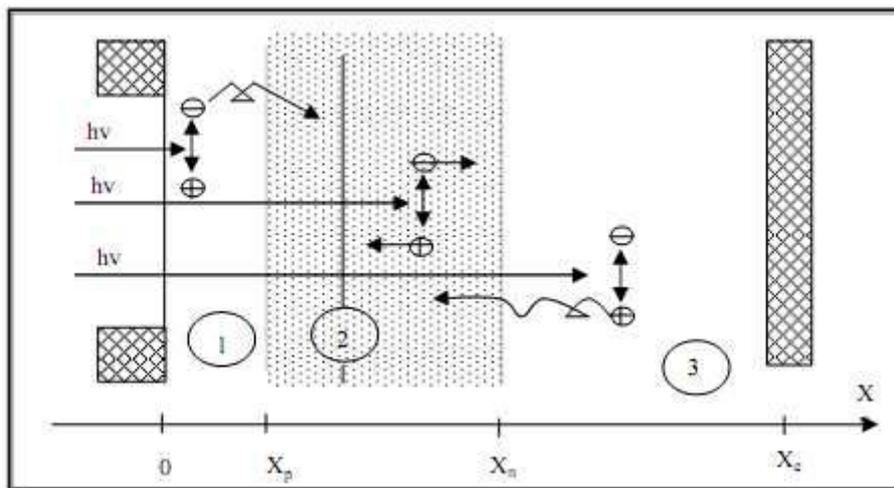


Figure II-5 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire [3].

II-6 Mécanismes de génération et de recombinaison des porteurs

II-6-1 La recombinaison :

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

Ceci mène à une classification possible des mécanismes de recombinaison. Dans le cas de la recombinaison non radiative elle transmet à un ou plusieurs phonons, et dans la recombinaison Auger elle est déchargée sous forme d'énergie cinétique à un autre électron [23,24].

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

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

a. La recombinaison bande à bande

Se produit quand un électron arrive de la bande conduction dans l'état vide de la bande de valence associée au trou. Cette transition de bande à bande est en général une transition radiative dans les semi-conducteurs à gap direct. En d'autre terme, c'est l'annihilation d'un électron de la bande de conduction et d'un trou de la bande de valence, ce processus est expliqué par l'attraction de la charge négative de l'électron et de la charge positive du trou qui conduit ces porteurs à l'annulation. L'énergie libérée pendant le processus produit un photon et émet de la lumière [24,25].

b. La recombinaison par pièges

Se produit quand un électron arrive dans un état d'énergie permis, qu'on appelle « piège ». La force responsable de ce mécanisme se situe dans la bande interdite. Elle est provoquée par la présence d'un atome étranger ou un défaut structural, tel que les macles ou les dislocations. Une fois le piège rempli, il ne peut pas accepter un autre électron, puis l'électron occupant cet état d'énergie de piège va encore faire un deuxième saut vers un état vide dans la bande de valence. On peut envisager ce processus comme une transition en deux étapes d'un électron de la bande conduction à la bande de valence ou comme étapes d'un électron de la bande de conduction à la bande de valence ou comme disparition de l'électron et du trou qui ne rencontre dans ce piège. Ceci s'appelle la recombinaison indirecte. Dans cette recombinaison non radiative, l'énergie dégagée est transmise à un ou plusieurs phonons. Souvent, elle libère l'énergie thermique ou produit des vibrations du réseau [23, 24, 25,26].

c. La recombinaison Auger

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

Généralement la recombinaison provient de la qualité de matériau, des micros défauts, les impuretés métalliques, de la taille de grain et la densité de dislocation.

Souvent, dans les cellules solaires épaisses, on néglige la vitesse de recombinaison en surface, en revanche, cette recombinaison a un effet important pour les cellules actuelles, pour

une couche mince ou bien une couche ultra mince , autrement dit, les effets en volume dans les couches minces deviennent moins importants que aux en surface.

La recombinaison en surface et en interface du semi-conducteur peut avoir un impact significatif sur le comportement des dispositifs. Ceci est dû au fait que les surfaces et les interfaces contiennent un grand nombre de centres de recombinaison en raison de la non périodicité du cristal à ces endroits. Cette interface comprend un grand nombre de pièges liés aux contraintes de fabrication de dispositif [3].

II-6-2 La génération [23,25]

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

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

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

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

II-7 Différents matériaux solaires :

Plusieurs matériaux solaires ont été exploités dans la conversion photovoltaïque à cause de leurs propriétés Optoélectroniques. L'évolution de la technologie des semi-conducteurs a permis de synthétiser de nouveaux matériaux tels que les semi-conducteurs binaires, ternaires et quaternaires. Ces composés ayant des avantages différents [27].

Certes, la première cellule utilisée dans le solaire était à base de silicium. La technologie de ce matériau a évolué rapidement et le silicium peut se trouver sous trois formes : mono cristallin, poly cristallin et amorphe. La fabrication du silicium mono cristallin est très coûteuse [25]. Les meilleures performances de cellules peuvent atteindre un rendement de 15% dans l'industrie et un rendement de 20% en laboratoire.

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

Le spectre solaire est très large, les cellules solaires à un seul matériau ne peuvent pas l'exploiter convenablement. Les tandems solaires tels que AlGaAs/Si, GaAs/Ge, CdS/CdTe, InGaP/GaAs et le GaAs/GaSb, permettent une amélioration [28].

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

La fabrication des matériaux solaires est suivie par un traitement thermique. L'évolution de la technologie du solaire a amélioré la qualité optoélectronique de ces matériaux, notamment du silicium poly-cristallin, sa qualité approche de plus en plus à celle du silicium monocristallin. Notons que la qualité des matériaux solaire est liée fortement aux conditions de fabrication.

II-8 Nouvelles structures photovoltaïques :

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

II-8-1 Cellule photovoltaïque conventionnelle :

La structure photovoltaïque conventionnelle est représentée dans la figure (II-6). L'exposition de cette configuration au rayonnement solaire va débiter un courant à la charge.

Nous constatons dans la figure (II-6) que la cellule solaire se compose de plusieurs couches telles que les deux zones actives (n et P), une jonction intercalant ces deux régions, d'autres couches à remplir successivement sont aussi nécessaires dans la structure photovoltaïque d'une cellule solaire. Cette structure a besoin de plusieurs améliorations afin de la rendre plus efficace et rentable, dans cette optique nous envisageons ultérieurement quelques structures technologiques.

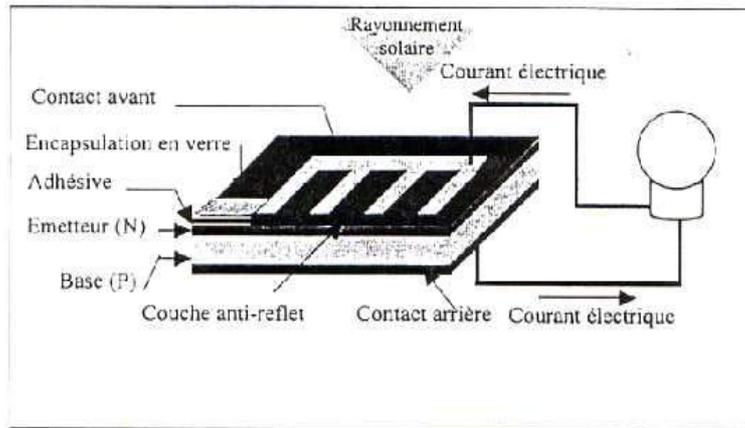


Figure II-6 Structure d'une cellule photovoltaïque conventionnelle [25].

II-8-2 Cellule à BSF [22] :

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

Afin de collecter les paires électron-trou créées par les radiations des grandes longueurs d'onde du spectre solaire, la configuration à champ arrière « BSF » « Back Surface Field ». (Figure II-7) a été proposée. Ce champ améliore les caractéristiques électriques de la cellule solaire, en particulier, la tension en circuit ouvert V_{oc} par réduction du courant d'obscurité I_{obs} . En effet, les porteurs devenus minoritaires après leur injection dans la zone arrière diffusent en s'éloignant de la zone de déplétion, le champ électrique arrière « BSF » les repousse vers la jonction.

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

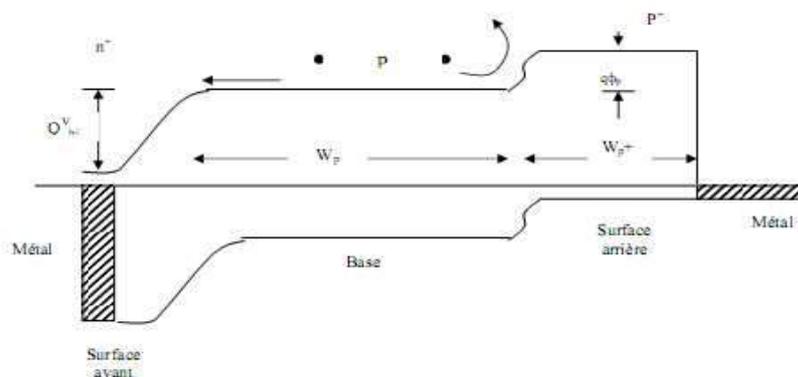


Figure II-7 Diagramme énergétique d'une cellule solaire à couche BSF [22]

II-8-3 Cellule solaire de type Schottky [20] :

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

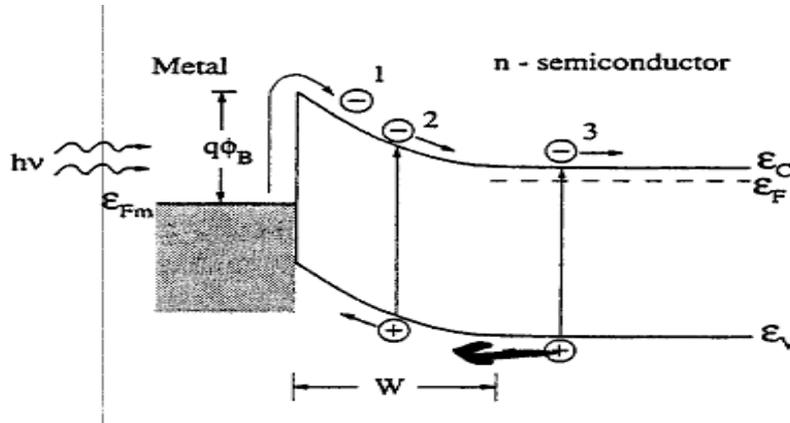


Figure II-8 Structure d'une cellule solaire (métal/SC type N) [20]

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

Les avantages de la jonction Schottky sont :

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

La barrière Schottky est formée par le dépôt de métal de couche mince sur un substrat de semi-conducteur donc la hauteur de ce barrière est dépend des caractéristiques et des propriétés de semi-conducteur et de métal déposé d'autre côté.

Dans ce travail on considère que le semi-conducteur est fixe « soit le Si soit le GaAs »

donc la hauteur de Barrière Schottky dans ce cas est dépend de la couche mince de métal déposé.

Premièrement la préparation de surface de semi-conducteur avant le dépôt de couche métallique peut influer sur la nature de contact obtenue. Donc on peut observer des différences remarquables entre les barrières Schottky formées sur :

1- des surfaces nettoyées chimiquement.

2- des surfaces clivées sous vide.

la couche d'oxyde natif de 10 à 15 Å d'épaisseur qui existe entre le métal et le semi-conducteur nettoyé chimiquement influence également les propriétés mécaniques des contacts car elle diminue l'adhérence des couches métalliques déposées.

B- des couches oxydes plus épaisses (de 50 à 100 Å) augmentent la hauteur de la barrière, ce type de contact n'est pas très stable avec la température et ce est principalement dû aux interfusions entre le métal et les constituants du semi-conducteur.

On choisit les semi-conducteurs (Si, GaAs) car ils sont des métaux de haute qualité cristalline atteignent des rendements remarquables, proches de 15%, pour le flux d'électrons qui va du semi-conducteur dans le métal, la hauteur de barrière Schottky prévue par le modèle de Schottky est

$$eV_b = \phi_M - \phi_{S/C}$$

C'est la différence des travaux d'extraction.

Pour le flux inverse des électrons de métal vers la bande de conduction de semi-conducteur la hauteur de barrière est

$$eV_{bn} = \phi_N - X_S$$

C'est la différence entre le travail de sortie de métal et l'affinité électronique du semi-conducteur. On a aussi :

$$eV_{bn} = E_g - (\phi_N - X_S)$$

Alors on prend le semi-conducteur (Si et GaAs) et les développe sur plusieurs métaux afin d'améliorer la barrière Schottky de ce contact dans le domaine d'application applicable.

Dans ce travail l'application de contact Schottky à la cellule solaire photovoltaïque donc on a besoin de minimiser la hauteur de barrière Schottky.

De telle sorte qu'il facilite le transport des porteurs des charges accumulés.

C'est-à-dire on minimise la différence entre le travail de sortie de métal et l'affinité électronique du semi-conducteur pour la plus petite valeur possible.

$X_S = 4,01 \text{ eV}$ et $X_{\text{GaAs}} = 4,07 \text{ eV}$ donc on varie le travail de sortie de métal de telle sorte qu'on minimise la hauteur de barrière Schottky au maximum possible.

- Voir un tableau qui donne les différences de travail de sortie des métaux.

-Tableu 1 : Métaux de forte travail de sortie

<i>Métal</i>	<i>Al</i>	<i>Ag</i>	<i>Ni</i>	<i>Au</i>	<i>Fe</i>	<i>AU</i>
ϕ_M (eV)	4,3	4,3	4,4	4,4	4,4	4,8

-Tableux2 donne la valeur de barrière Schottky pour quelque contact

		<i>Au</i>	<i>Pt</i>	<i>Ti</i>	<i>Al</i>	<i>Ag</i>
<i>Si</i>	<i>Type N</i>	0,8	0,9	0,5	0,72	0,62
	<i>Type P</i>	0,34		0,61	0,42	0,41
<i>GaAs</i>	<i>Type N</i>	0,9	0,84		0,8	0,72
	<i>Type P</i>	0,42			0,5	0,42

- On remarque que pour la hauteur de barrière Schottky soit le minimum possible pour le métal Al et Au et Ag spécialement avec semi-conducteur type (p).

II-9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé quelque notion de base relatives au rayonnement solaire, telles que le spectre solaire et les mécanismes de leur interaction avec les matériaux semi-conducteurs comme l'absorption, la génération et la recombinaison des porteurs de charges.

Cette initiation, d'après la littérature, est nécessaire pour bien comprendre le mécanisme de la conversion photovoltaïque.

On a décrit aussi la cellule photovoltaïque, ses différentes structures technologiques, la cellule solaire sous illumination et le phénomène fondamental de la photo génération.

Chapitre III

Résultats et discussions

Introduction

Dans ce travail l'application de contact Schottky est à la cellule solaire photovoltaïque donc on est besoin de minimisé la hauteur de la barrière Schottky de telle sorte en facilité le transport des porteurs des charges.

La barrière Schottky est formée par la dépose de métal de couche mince sur un substrat de semi-conducteur donc la hauteur de cette barrière est dépend des caractéristiques est des propriétés de semi-conducteur et de métal déposé d'autre coté.

Les chapitres précédents contiennent des définitions et des notions sur les phénomènes photoélectriques qui apparaissent dans une cellule solaire à barrière Schottky sous éclairément. L'objectif de notre travail est de donner une étude comparative du Rendement de Collecte et de la caractéristique IV et le Rendement de conversion de cette structure contenant une couche de métal déposée en face avant et semi-conducteur GaAs ou semi-conducteur à bande interdite variable $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$; et de traiter les effets de dopage, l'épaisseur de couche BSF et la vitesse de recombinaison superficielle S et le gradient de la bande interdite sur les résultats obtenues. Ce travail débutera par l'exposition des réponses spectrales de la structure Au/GaAs et ensuite la structure Au/ $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ on calcule les densités du courant et la tension de court-circuit on finira par calculer le Rendement de conversion des deux structures.

III.1 Pour la structure métal/SC (GaAs)

III.1.1 Influence du coefficient de transition et de réflexion :

On est besoin de bien définir l'épaisseur de métal (de l'Au) déposé sur le substrat de GaAs; donc on a minimisé l'épaisseur de métal de tell sorte en facilité la pénétration des photons. Transmission, réflexion, et absorption des photons pour 50° d'Au déposé sur un substrat de GaAs.

Donc la hauteur de Barrière Schottky dans ce cas est dépend de la couche mince de métal déposé.

- premièrement la préparation de surface de semi-conducteur avant le dépôt de couche métallique peut influencer sur la nature de contacte obtenue.

Donc on peut observer des différences remarque entre le Barrière Schottky formées sur :

1- des surfaces nettoyées chimiquement.

2- des surfaces clivées sous vide.

la couche d'oxyde natif de 10 à 15Å d'épaisseur qui existe entre le métal et le semi-conducteur nettoyé chimiquement influencé ce pendent les propriétés mécaniques des contacts car elle diminué l'adhérence des couches métalliques déposées.

Des couches oxydes plus épaisses (de 50 à 100Å) augmentent la hauteur de la barrière, ce type de contact n'est pas très stable avec la température et ceci est principalement du aux inters diffusions entre le métal et les constantans de semi-conducteur.

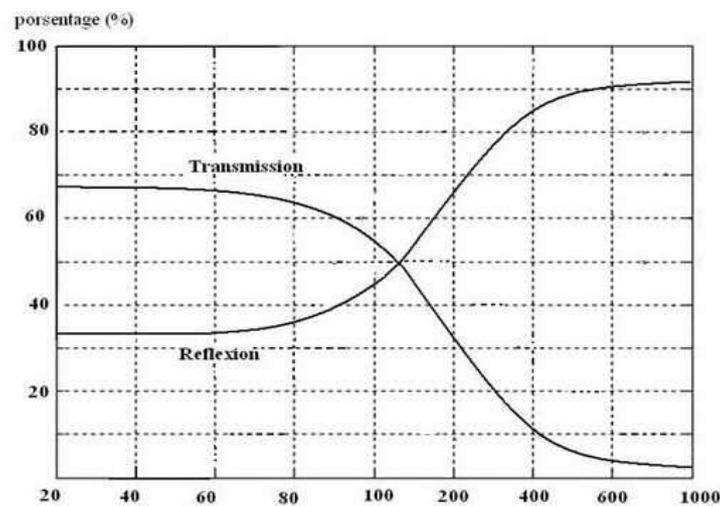


Figure 3-1 : variation de coefficient de transition et réflexion

En fonction de l'épaisseur de la couche métallique déposée [22] .

III.1.2 Influence de niveau de dopage de la couche BSF Sur La vitesse de recombinaison superficielle.

On peut étudier l'influence de niveau de dopage de la couche BSF sur La vitesse de recombinaison superficielle.

Nous verrons par le précédent que dans le cas de l'utilisation de l'Au il est correspondu l'épaisseur de la couche BSF (0.5µm) et le dopage de cette dernier (1.10^{18} et 7.10^{19} cm-3).

La courbe au-dessus montre variation de dopage de la couche BSF en fonction la vitesse de recombinaison superficielle.

On remarque, que la vitesse de recombinaison superficielle diminue pour des dopages supérieurs de $N_a=10^{16}$ jusqu'à la valeur de $N_a=10^{19}$ reste constante, donc il faut optimisée le

dopage de la couche BSF d'une manière à avoir une bonne valeur de la vitesse de recombinaison superficielle capable d'améliorer le rendement.

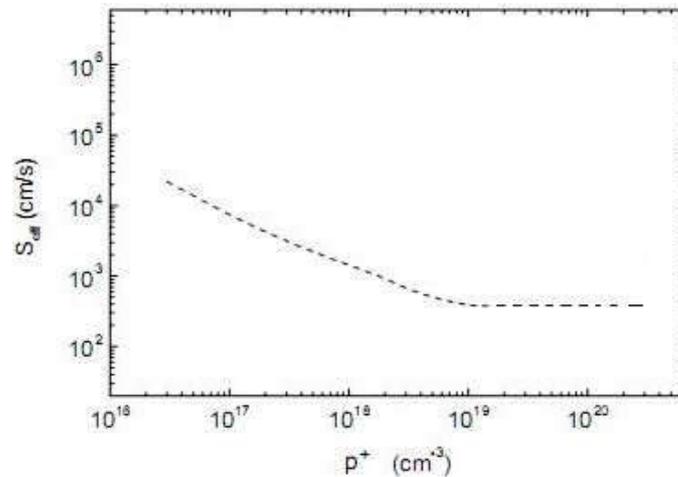


Figure 3-2 : variation de La vitesse de recombinaison superficielle en fonction le dopage de la couche BSF .

La réduction de la valeur de vitesse de recombinaison en face arrière passe par l'augmentation du rapport de concentration de dopage Na^+/Na , mais l'augmentation de ce rapport introduit un autre phénomène physique enjeu, qui est l'Effet BGN.

L'étroitement de la bande du gap (Banda Gap Narcotique) BGN joue un rôle très important dans les cellules solaires contenant des couches fortement dopées supérieures à 10^{17}cm^{-3}

Dans le tableau suivant on regroupe les différents paramètres de la structure Au/p-GaAs p^+ nécessaires pour la simulation numérique de la structure BSF/ avec BGN

Cellule solaire Au/GaAs	Dopage (cm^{-3})	Constant de diffusion (cm^2s^{-1})	Épaisseur (μm)	S_p
Base p	10^{17}	200	4	$2 \cdot 10^4$
Région p^+	10^{19}	46	0.5	$2 \cdot 10^4$

Tableau 3-1 : paramètres de la structure Au/p-GaAs p^+ nécessaires pour la simulation numérique de la structure BSF/ avec BGN.

III.1.3 Influence de l'épaisseur de la couche BSF sur La vitesse de recombinaison superficielle.

Il est clair qu'un BSF épais ($0.5 \mu\text{m}$) et fortement dopé entre ($1 \cdot 10^{18}$ et $7 \cdot 10^{19}$) diminue d'une grande proportion la vitesse de recombinaison superficielle en face arrière conduisant ainsi à une augmentation des caractéristiques électriques de cellule solaire à barrière Schottky.

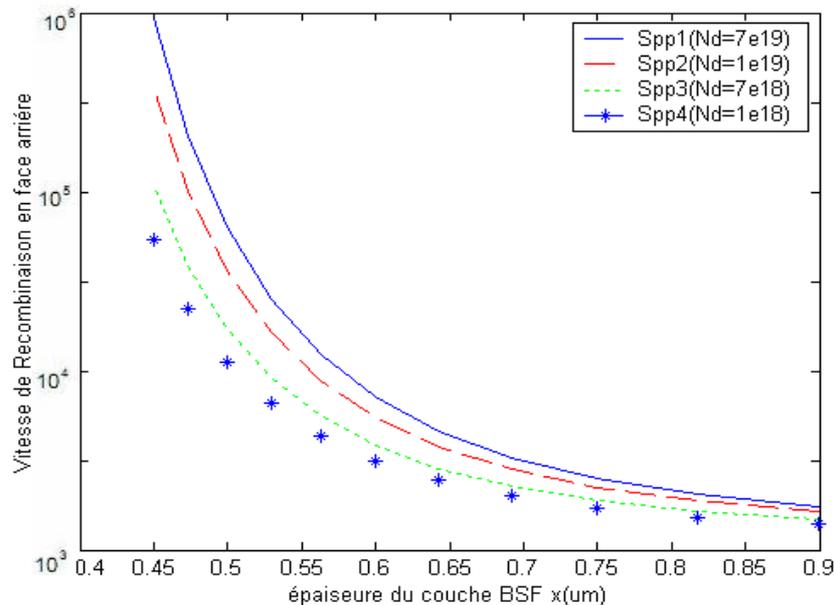


Figure 3-3 : variation de La vitesse de recombinaison superficielle en fonction l'épaisseur de la couche BSF .

L'action de diminution l'épaisseur de la couche BSF réduit par conséquent la quantité des porteurs minoritaire perdue. Ce qui augmente la photo génération. En ce qui concerne la variation de l'épaisseur de la couche BSF, figure 4.3 on remarque bien que la diminution de cette épaisseur au dessous de $0.6 \mu\text{m}$ réduit la valeur de recombinaison superficielle, par conséquent l'augmentation de rendement de collecte au niveau de la cellule solaire à barrière schottky.

III.1.4 Influence de la recombinaison superficielle sur la concentration des porteurs minoritaires ΔP :

On résulte que: l'amélioration de la recombinaison superficielle en face arrière (dépôt d'une couche BSF avec une épaisseur et dopage bien définie) assure l'augmentation de la concentration des porteurs minoritaires à cause de champ électrique (opposite sens) de celle créé par la ZCE; ceci diminue les pertes de la recombinaison superficielle en face arrière.

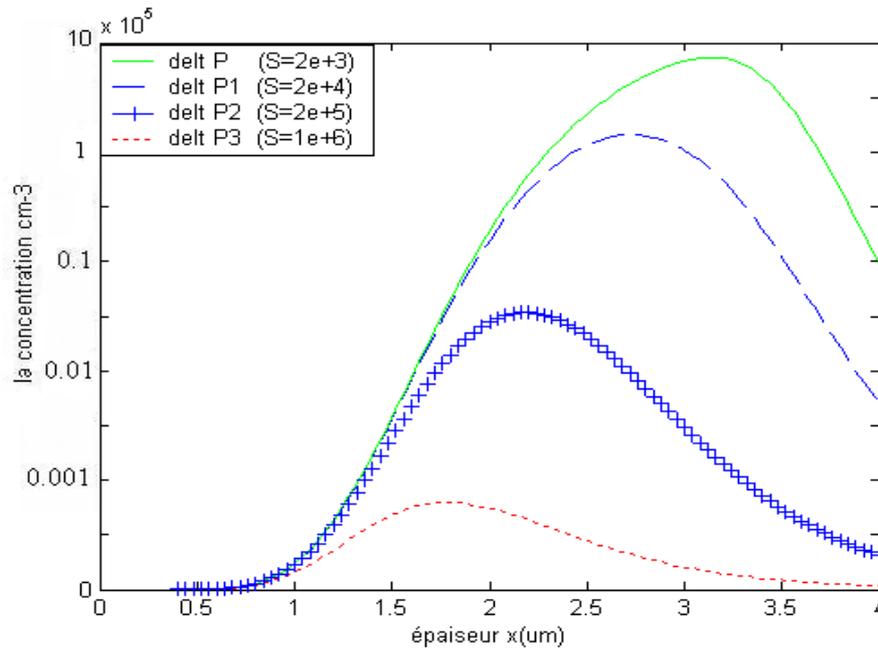


Figure 3-4 : variation de la concentration ΔP en fonction
l'épaisseur de la base pour plusieurs valeurs de S

Afin de collecter les paires électron/trous créées par les radiations de grandes longueurs d'onde du spectre solaire, on a imaginé de réaliser un champ électrique par transition de dopage, vers la face arrière de la cellule solaire Au/p-GaAs. Les porteurs excédentaires ainsi créés au voisinage de cette zone, au lieu de s'y recombiner, sont repoussés par le champ BSF vers la région de charge d'espace de la jonction. Ils participent au photocourant dans la mesure où la longueur de diffusion de ces porteurs de charge est plus importante que l'épaisseur totale de la couche p de la cellule. L'introduction du champ électrique arrière améliore les caractéristiques électriques de la cellule solaire, en particulier la tension de circuit ouvert. En effet, les porteurs devenus minoritaires après leur injection dans la zone arrière diffusent en s'éloignant de la zone de déplétion, le BSF les repousse vers la jonction. Seuls les porteurs majoritaires franchissent ce gradient de dopage.

Concernant la simulation de la cellule solaire à barrière Schottky avec un champ de surface arrière, on étudie la variation des paramètres électriques de la cellule dans laquelle la base améliore sa contribution dans la réponse spectrale par l'addition de la couche BSF de cette cellule.

III.1.5 Influence de métal déposé sur la réponse spectrale.

Comparaison entre les réponses spectrales Au/p-GaAs, Ag/p-GaAs et Al/p-GaAs pour $S_0 = 2 \cdot 10^4 \text{ cm/s}$

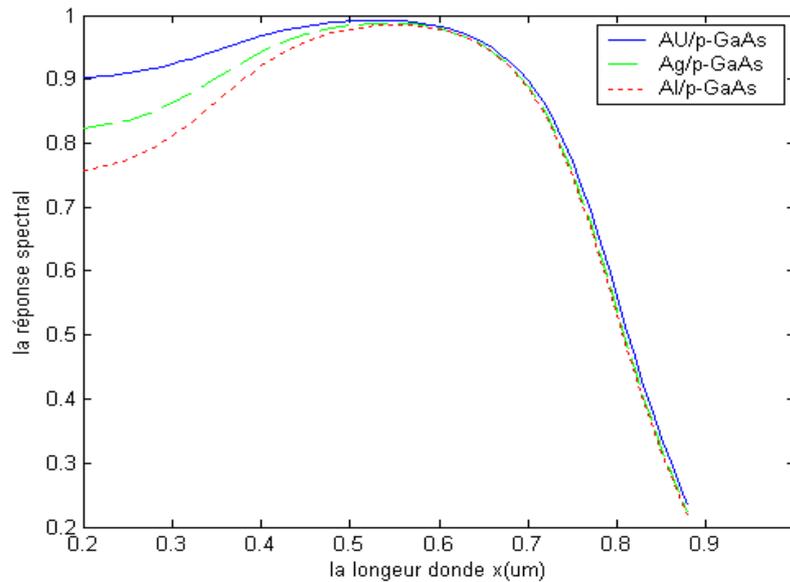


Figure 3-5 : Influence de métal déposé sur la réponse spectrale.

La nature et l'épaisseur de métal déposé influent largement sur la photo génération, par l'augmentation de la hauteur de la barrière Schottky. La courbe 3.5 montre bien que l'augmentation de cette barrière réduit le rendement de collecte.

L'action d'augmenter la hauteur de la barrière Schottky réduit par conséquent la quantité de la lumière pénétrant à la base. Ce qui réduit la photo génération et en plus, les porteurs minoritaires.

La variation de métal déposé et leur épaisseur conduit vers la réduction du rendement de collecte, cette action est due à minimiser la hauteur de barrière de telle sorte en facilité la pénétration des photons, cette figure montre l'importance des porteurs en excès générés par les courtes longueurs d'onde pénétré par le métal déposé.

Donc l'amélioration de photo courant nécessite la réduction de la barrière Schottky formé.

III.1.6 La réponse spectrale

III.1.6.1 Jonction Au/p-GaAs ($S_p=1.10^6$) :

La structure à étudier est une cellule solaire à barrière Schottky à base de GaAs, elle est constituée principalement d'une semi-conducteur de type p et du métal de l'Au d'épaisseur $x_m=50\text{Å}$. Nous fixons le dopage de la région (type p) à $N_a=5.10^{17}\text{ cm}^{-3}$, et l'épaisseur de la cellule $H=4\text{ }\mu\text{m}$. Notons que la vitesse de recombinaison superficielle au surface $S_n=1.10^6\text{ cm/sec}$ et l'auteur de barrière Schottky $V_d=0.4\text{ eV}$.

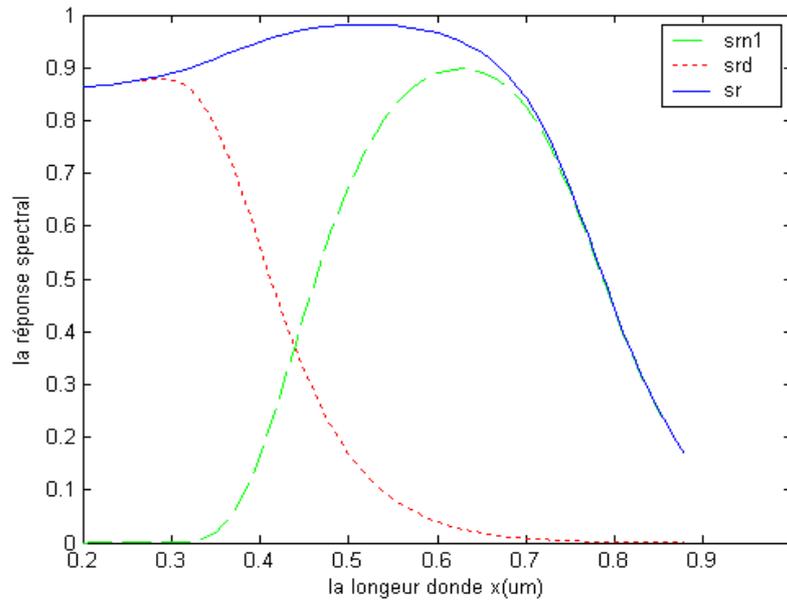


Figure 3-6 : la réponse spectrale de la structure Au/p-GaAs pour $S_p=1.10^6$.

Dans la figure (3.6) , on illustre le rendement de collecte de la structure Au/p-GaAs pour $S_p=1.10^6$ On remarque que la collection des porteurs minoritaires est dans la région des longues longueurs d'ondes qui sont absorbée dans la partie profonde de la structure (base) , cette collection est due au fait que les porteurs de charge ainsi créés au voisinage du Schottky ohmique sont repoussés vers la région de charges d'espace de la jonction. Ils participent au photocourant, cette participation n'est pas importante dans le cas ou $S_p=1.10^6$ est largement supérieur.

III.1.6.2 Jonction Au/p-GaAs ($S_p=2.10^4$) :

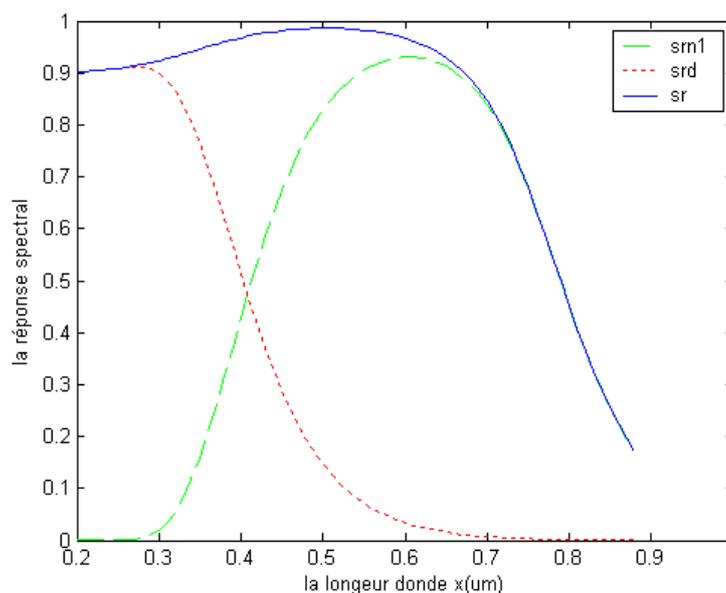


Figure 3-7 : la réponse spectrale de la structure Au/p-GaAs pour $S_p=2.10^4$.

La structure à étudier est une cellule solaire à barrière Schottky à base de GaAs, elle est constituée principalement d'un semi-conducteur de type p et du métal de l'au d'épaisseur $x_m = 50 \text{ \AA}$. Nous fixons le dopage de la région (type p) à $N_a = 5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, et l'épaisseur de la cellule $H = 4 \text{ \mu m}$, et l'épaisseur de la couche BSF $W_p = 0.5 \text{ \mu m}$.

Notons que la vitesse de recombinaison superficielle au surface $S_n = 2 \cdot 10^4 \text{ cm/sec}$ et l'auteur de barrière Schottky $V_d = 0.4 \text{ eV}$.

Dans la figure (3.7), on illustre le rendement de collecte de la structure Au/p-GaAs pour $S_p = 1 \cdot 10^4$. On remarque que la collection des porteurs minoritaires est améliorée dans la région des longues longueurs d'ondes qui sont absorbées dans la partie profonde de la structure (base), cette amélioration est due au fait que les porteurs de charge ainsi créés au voisinage du contact Schottky sont repoussés vers la région de charges d'espace de la jonction. Ils participent au photocourant, cette participation est importante dans le cas $S_p = 1 \cdot 10^6$ est amélioré.

La couche BSF (Back Surface Field), a pour rôle la création d'un champ électrique retarder en face arrière, qui permet d'abaisser la valeur effective de la vitesse de recombinaison et par conséquent d'améliorer les caractéristiques électriques de la cellule.

III.1.7 Comparaison entre les réponses spectrales Au/p-GaAs et Au/n-GaAs

Comparaison entre les réponses spectrales Au/p-GaAs et Au/n-GaAs pour $S_0 = 2 \cdot 10^4$

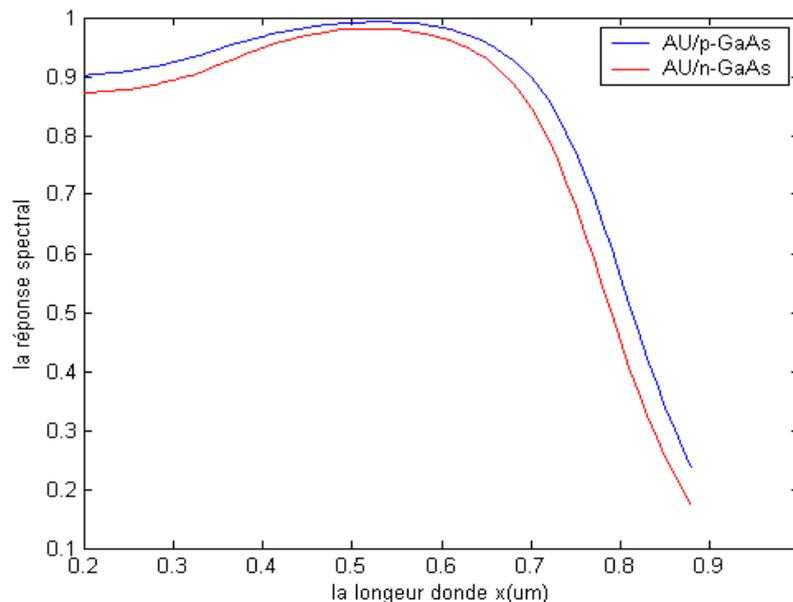


Figure 3-8 : la réponse spectrale de la structure Au/p-GaAs et Au/n-GaAs pour $S_p = 2 \cdot 10^4$

Donc la couche BSF (Effet du champ électrique arrière sur la réponse spectrale) améliore légèrement le rendement énergétique ; la création d'un champ électrique retarder en face arrière, qui permet d'abaisser la valeur effective de la vitesse de recombinaison superficielle et par conséquent d'améliorer les caractéristiques électriques de la cellule.

Les meilleures performances sont :

$I_{cc} = 0.02452$ A, $V_{co} = 0.5640$ V, $\eta = 13.1$ %.

Afin de mettre la passivation de face arrière par la couche (le maintien des porteurs minoritaires de la face arrière) nous avons comparé la réponse spectrale de cellule solaire a barrière Schottky (sans BSF et avec BSF). On observe une augmentation importante de la réponse spectrale, le champ arrière améliore la collecte par la diminution de recombinaison superficielle en face arrière ; la couche formée est très mince ($0.5\mu\text{m}$).

Les grandeurs	Cellule sans BSF	Cellule avec BSF
V_{co} (Volts)	0.5569	0.5640
J_{cc} (mA/cm ²)	24.126	25.526
FF	78.12	78.9
η (%)	11.81	13.11

Tableau 3-2 : les résultats trouver de la simulation numérique pour la structure Au/p-GaAs nécessaire pour avec BGN

III.1.8 Influence de dopage de la base sur la réponse spectrale

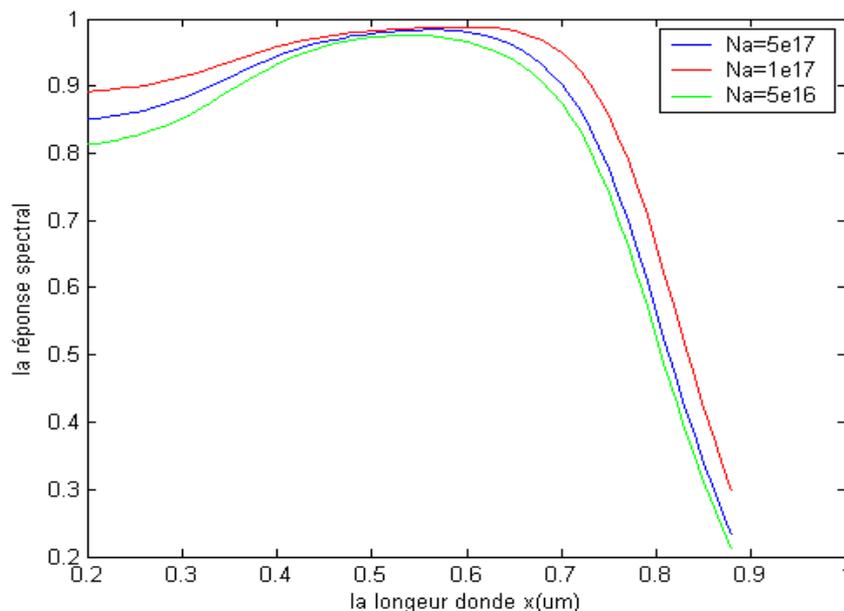


Figure 3-9 : Influence le dopage de la base sur la réponse spectrale de la structure Au/p-GaAs pour $S_p = 2 \cdot 10^4$.

L'amélioration de réponse spectrale due à l'augmentation de niveau de dopage diminue la largeur de la ZCE, pour rapprocher la sorte de la ZCE de la surface, puisque la longueur de diffusion des porteurs en excès prédomine, elle dépend de la concentration en dopant.

Peut être aussi à la diminution de la longueur de diffusion dans la base.

L'augmentation de rapport de concentration de dopage, introduit un autre phénomène physique en jeu; qui est l'effet de BGN. L'étroitement de la bande gap (Band Gap Narrowing) joue un rôle très important dans les cellules solaires contenant des couches fortement dopées.

III.1.9 caractéristique

III.1.9.1 Influence-le type de semi-conducteur sur la densité de courant

Équivalent présente les différents courants circulant dans la cellule dans le but d'utiliser ce circuit pour prévoir les grandeurs de sortie de la cellule solaire.

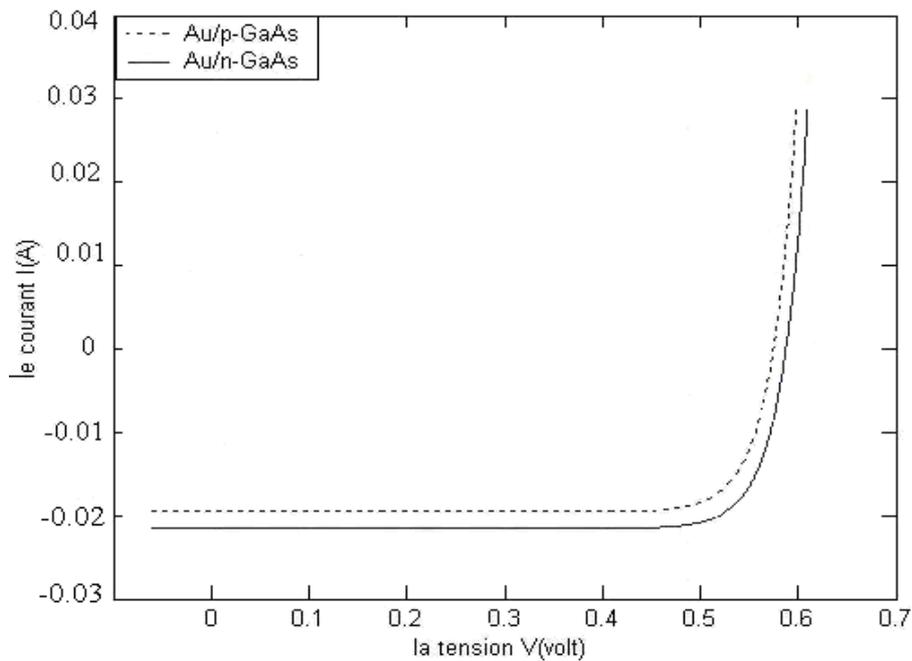


Figure 3-10 : caractéristique IV pour la structure Au/n-GaAs et Au/p-GaAs

Sur la figure 3-10 qui illustre la caractéristique courant-tension de la cellule avec BSF et avec BGN, on remarque une certaine amélioration avec le SC type P.

Les grandeurs	Au/n-GaAs	Au/p-GaAs
Vco (Volts)	0.5599	0.5640
Jcc (mA/cm ⁻³)	24.926	25.526
FF(%)	77.89	78.9
η (%)	10.61	13.11

Tableau 3-3 : les résultats pour la structure Au/n-GaAs et Au/p-GaAs

III.1.9.2 Influence-la nature de semi-conducteur sur la densité de courant

La variation des couples du contact Schottky avec un métal fixe présente l'efficacité du choisir un complément du métal pour avoir l'aspect général de contact.

En peut trouver la fréquence de la coupure plus utile dans ce domaine.

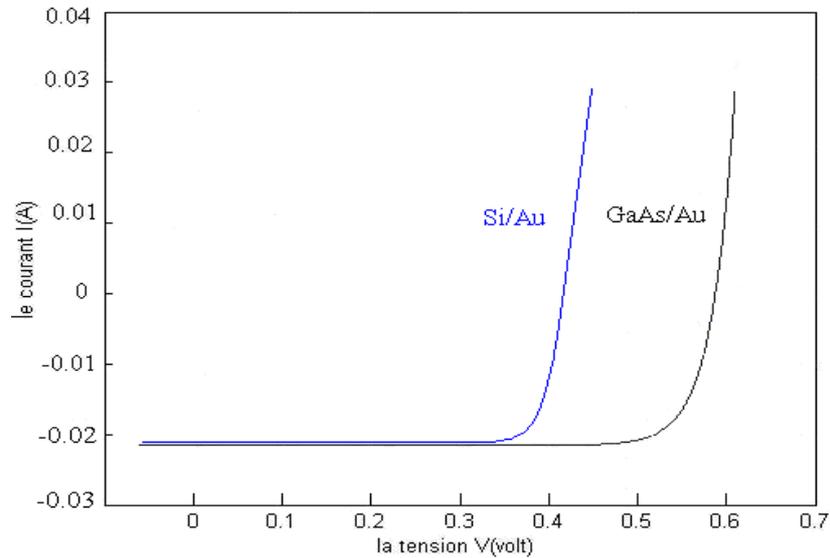


Figure 3-11 : caractéristique IV pour la structure Au/Si et Au/GaAs

III.1.9.3 Influence-le type de métal sur la densité de courant

Le choix du semi-conducteur le plus répandue à haute fréquence ne permet de réaliser un contact valable pour quelque le métal, il alors on prend le semi-conducteur GaAs et le développé sur plusieurs métal a fin amélioré le contact dans le domaine applicable.

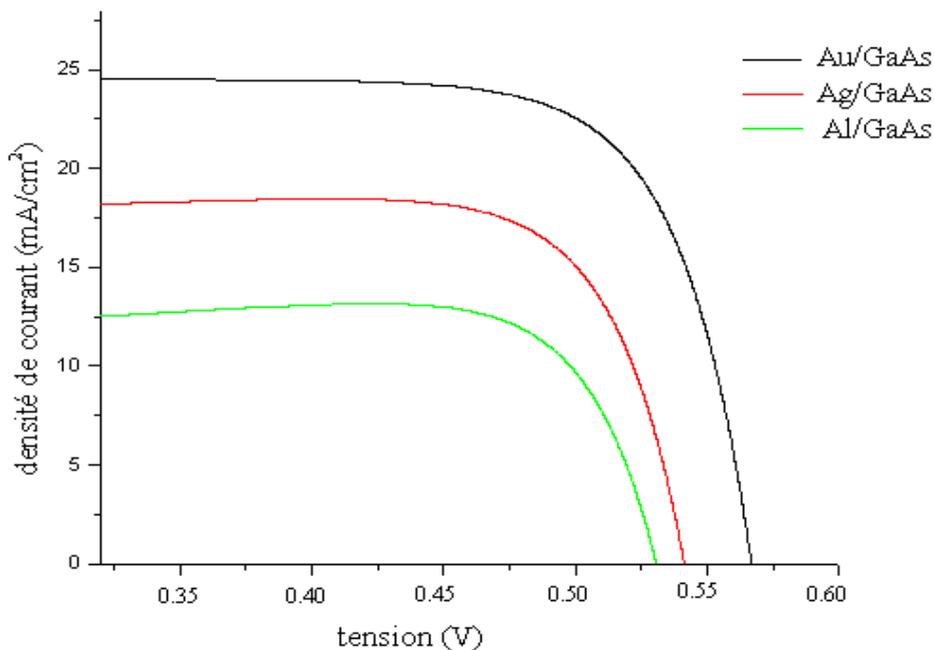


Figure 3-12 : caractéristique IV pour la structure Al/ GaAs, Ag/GaAs et Au/ GaAs

III.2 Pour la structure métal/SC(P- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$)

Le choix du semi-conducteur pour la réalisation d'un composant optoélectronique et plus précisément l'utilisation des semi-conducteurs P- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ dans la photo convertisseurs sont conditionnés par la courbe de sa réponse spectrale.

La performance des composants électroniques exige l'amélioration des paramètres principaux comme sa réponse spectrale, photosensibilité, rendement quantique, temps de réponses etc.

III.2.1 Influence de la fraction molaire sur la réponse spectrale de cellule solaire structure Au/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

L'allure de la Figure 3-13 exprime la contribution des deux zones, la base, et la région de déplétion. Pour les photons de basse énergie, les porteurs excédentaires sont générés dans la base AlGaAs parce que le processus d'absorption aura lieu dans cette région, car l'énergie des photons incident est suffisante pour la transition des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction ; et on résulte que la réponse spectrale interne pour les basses énergies dépend de la bande interdite et l'épaisseur du semiconducteur AlGaAs . Si l'énergie des photons augmente à E_g l'excitation se passe dans la couche absorbante à partir de cette valeur ; dans ce cas l'énergie devient suffisante pour la transition des porteurs entre les deux bandes de valence et de conduction par conséquent l'absorption est commencé pour $h\nu = E_g$ dans le semiconducteur AlGaAs . Lorsque l'énergie $h\nu$ est supérieure à E_g , on obtient une large absorption dans le même semiconducteur AlGaAs et la réponse spectrale dans le cas ou $h\nu = E_g$ due aux effets photoélectrique dans le semiconducteur .

La réponse spectrale interne dans le cas des radiations à haute énergie, dépend des paramètres du semiconducteur ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) et la vitesse de recombinaison en surface, tan que la vitesse de recombinaison réduite ($<10^2$ cm/sec) la réponse spectrale devient comparable à la réponse idéale.

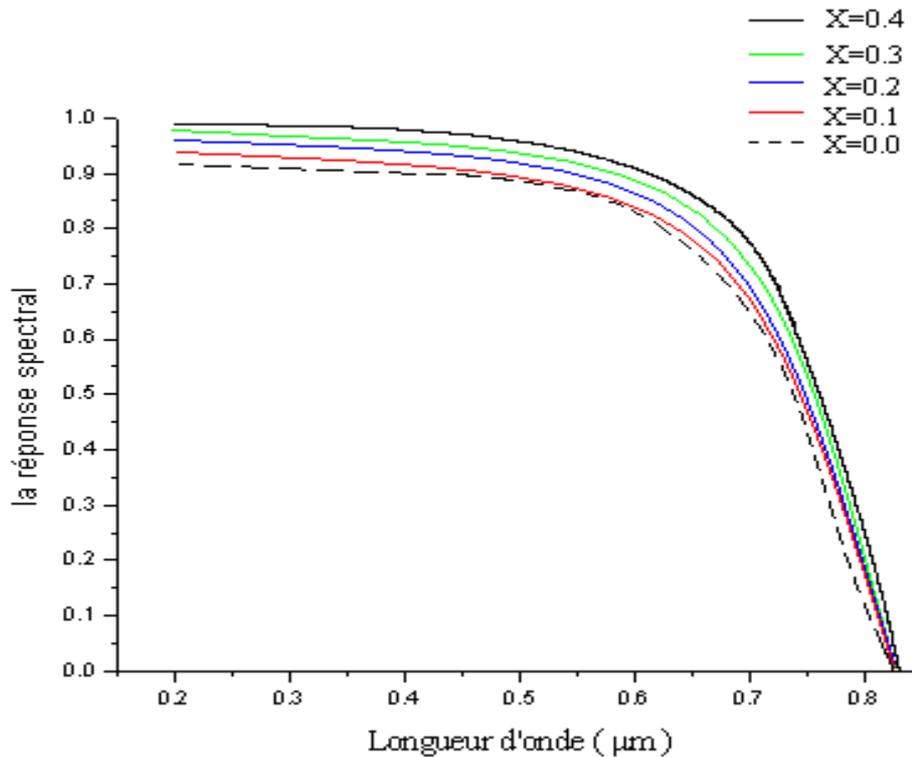


Figure 3-13: influence de la fraction molaire x sur la réponse spectrale $0.0 < X < 0.4$

Par conséquent l'augmentation de la réponse spectrale dépend de la valeur de la fraction molaire, par ce que la valeur de l'affinité électronique diminue par la diminution de la fraction molaire ; par contre l'énergie de la bande interdite E_g augmente.

D'autre part la barrière Schottky va se minimiser par la diminution de l'affinité électronique par la relation :

$$V_b = \phi_M - \chi_{SC}$$

Le deuxième effet qui influe sur la réponse spectrale c'est la vitesse de recombinaison, cette influence représentée par la Fig.4-14, est remarquable pour $h\nu = E_g$ (la bande interdite de semiconducteur) ce qui veut dire que l'influence de recombinaison est dominante dans le semiconducteur . Le processus de recombinaison réduit la concentration des porteurs excédentaires.

III.2.3 Influence de la vitesse de recombinaison sur la réponse spectrale de cellule solaire structure Au/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Lorsque la vitesse de recombinaison diminue le rendement quantique augmente jusqu'à la valeur $S_n < 10^2 \text{cm/sec}$ ou son effet devient négligeable. En outre, la grande valeur de recombinaison en surface diminue la concentration des porteurs diffusés collectés par la jonction et par conséquent la densité des photocourants diminue.

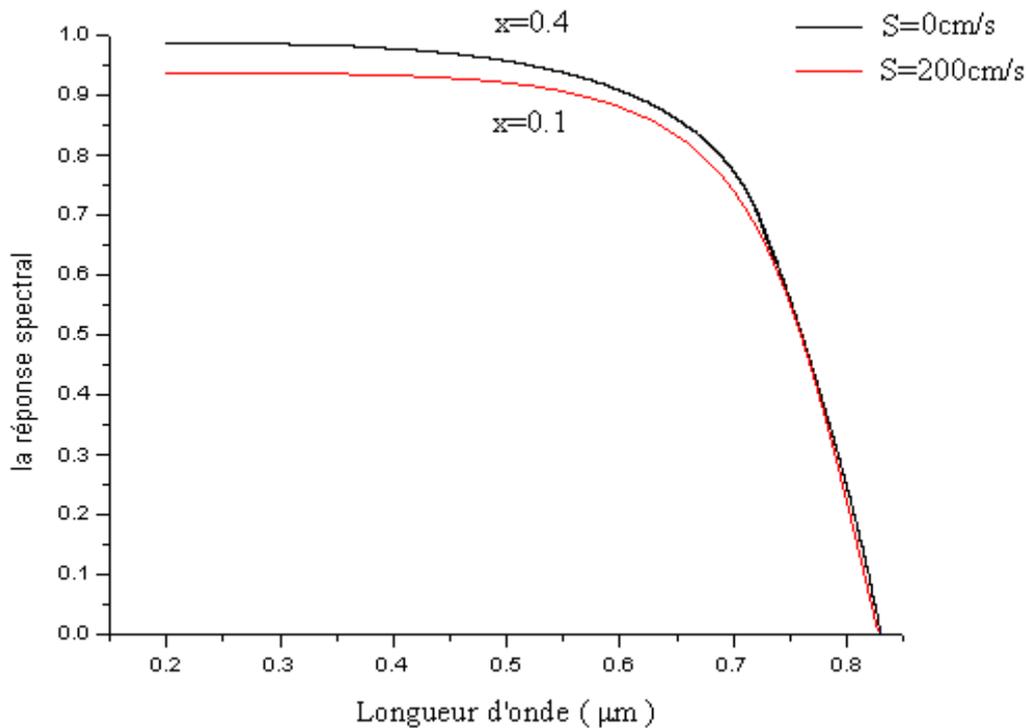


Figure 3-14: influence de la vitesse de recombinaison superficielle sur la réponse spectrale $0 \text{cm/s} < S < 10^2 \text{cm/s}$

On considère la structure 4-14 où on remplace la région p^+ par $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ avec l'épaisseur de $W_p^+ = 0.5 \mu\text{m}$ et la fraction molaire $x=0.1$ pour $S=200 \text{cm/s}$ et $x=0.4$ pour $S=0 \text{cm/s}$.

la réponse spectral de cette région calculer à l'aide d'équation $\eta(\lambda) = \eta_w + \eta_p$ et remplacer par α (le coefficient d'absorption), les résultats en fonction de ces deux paramètres sont représentées.

Le rendement interne dans un cellule solaire à barrière Schottky atteint l'unité pour les courtes longueurs d'onde à cause de l'absorption intense des radiations dans cette gamme de longueur

d'onde et si on suppose qu'on a faible vitesse de recombinaison en surface; Le terme $\frac{S_n}{\alpha D_n}$ négligeable. Dans ce cas, on peut dire que la création des porteurs est idéale et se passe

en surface $X=0$ ($\frac{hc}{\lambda} \geq E_g$) ou' la recombinaison est négligeable en face arrière ($S_n < 10^2 \text{ cm/sec}$). Les grandes longueurs d'onde, le rendement interne commence à diminuer lors de l'augmentation de la longueur d'onde ou' la vitesse de recombinaison en volume est négligeable ($L_n \gg d_0$).

La diminution de rendement montre la diminution de l'absorption et la création des porteurs à cause de la diminution de l'énergie incidente $h\nu$ (basse énergie).

III.2.4 Influence de l'épaisseur de la base sur la réponse spectrale de cellule solaire structure Au/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

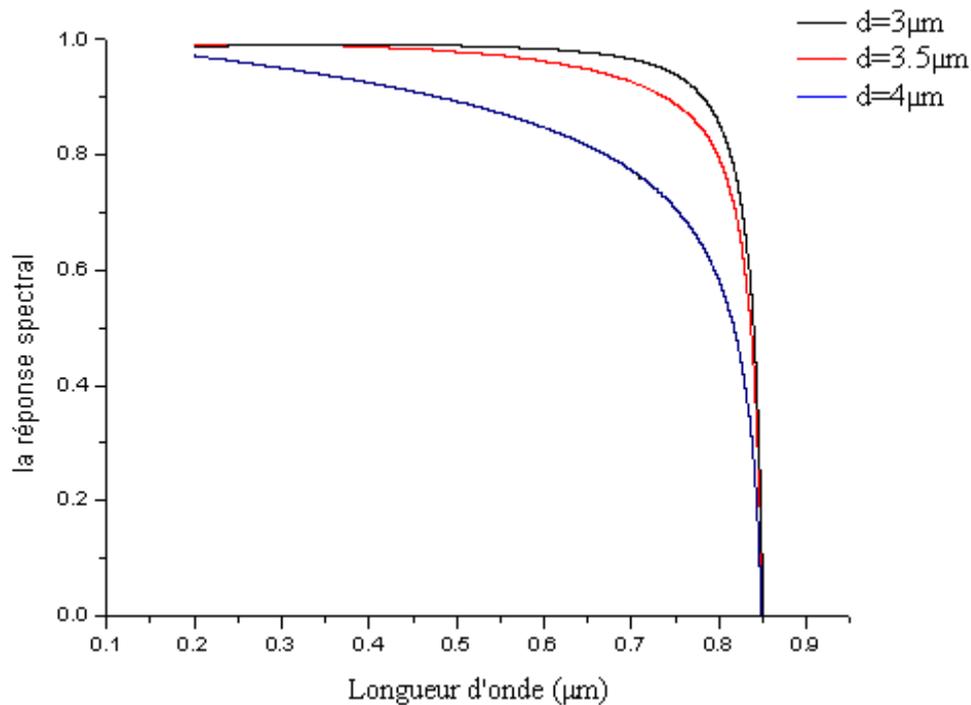


Figure 3-15: influence de l'épaisseur de S/C sur la réponse spectral la fraction molaire $X=0.4$ et $0 \text{ cm/s} < S < 10^2 \text{ cm/s}$

À partir de l'aspect physique dans cette influence on distingue que la diminution d'épaisseur de la couche absorbante augmente le rendement dans le semi-conducteur $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ (Fig.3-15), puisque les épaisseurs inférieures à $3 \mu\text{m}$ ne sont plus suffisantes pour l'absorption complète dans $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ et le flux transmet ou' il crée des paires électrons-trous.

En résulte que l'augmentation d'épaisseur diminue la création interne des porteurs dans la base et sa profite ce qui augmente le rendement de collecte.

III.2.5 Caractéristique Courant Tension de la cellule

La cellule solaire sous forme Au/p-Al_xGa_{1-x}As éclairée résulte une photocourant :

$$J_{ph} = e\phi_0\eta_{total}(\lambda)$$

Une partie de cette photocourant est utilisable car le courant de la diode (courant d'obscurité) qui résulte par la polarisation directe de la jonction s'oppose au photocourant totale. La densité de courant délivré par une cellule solaire est : $J = J_{ph}(\lambda) - J_{obs}(V)$

La caractéristique de courant en fonction de la tension V à différentes vitesses de recombinaison est représentée sur les figures suivantes :

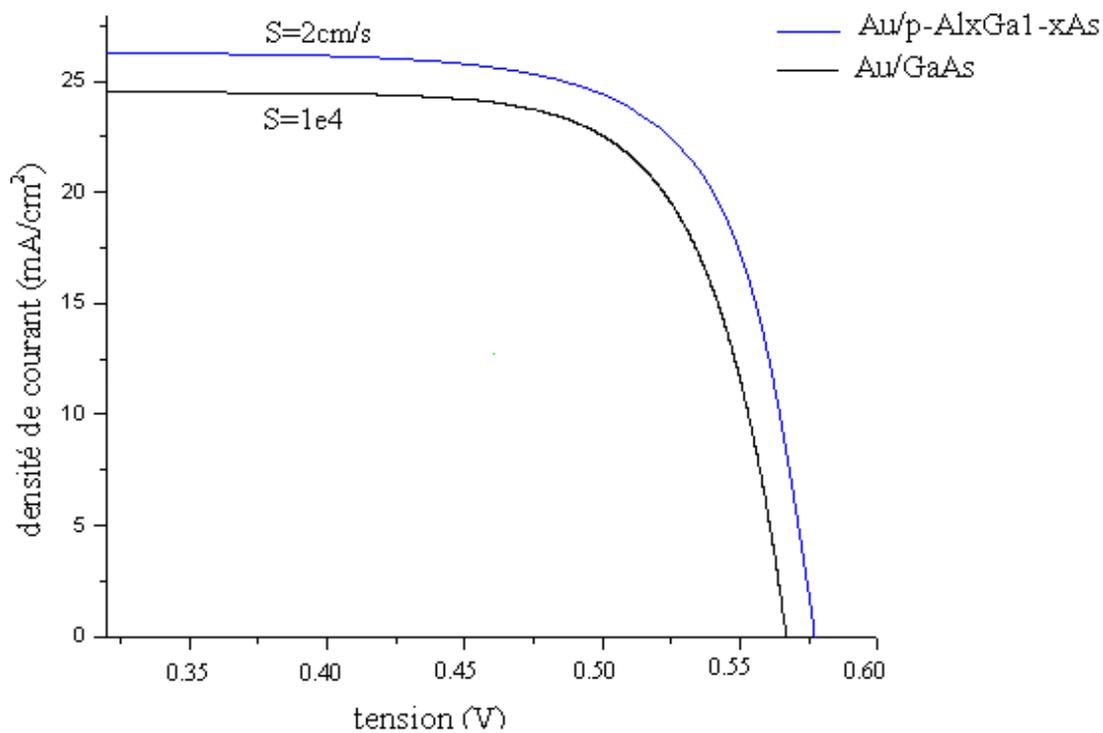


Figure 3-16: Caractéristique courant-tension à différentes.

La variation de la vitesse de recombinaison influe fortement sur la densité de courant et sur la tension de court circuit ; pour chaque diminution de recombinaison on enregistre une augmentation de la densité de courant. La vitesse de recombinaison influe sur les deux densités : le photocourant et le courant d'obscurité, cette influence est considérable pour le photocourant.

Les grandeurs	Au/p-Al _x Ga _{1-x} As	Au/p-GaAs
V _{co} (Volts)	0.5829	0.5640
J _{cc} (mA/cm ⁻³)	27.026	24.926
η (%)	15.61	13.11

Tableau 3-4 : les résultats pour la structure Au/n-GaAs et Au/p-GaAs

CONCLUSION GÉNÉRALE

Il ya une amélioration des valeurs de courant de court circuit et de la tension de circuit ouvert ainsi que le rendement de conversion avec des grandeurs acceptables. le champ électrique (BSF) est réalisé par l'implantation d'une jonction (High-Low Junction), à la surface arrière de la base de cellule solaire, cette jonction est constituée par la juxtaposition de deux matériaux un semi-conducteur (GaAs) et le métal (Au) déposé en front. Mais avec cette technique pour aborder une intensité maximale du champ électrique, il faut y'avoir un rapport de concentration (pour le semi-conducteur de type p) maximale. Mais le semiconducteur est soumis au phénomène de l'étranglement de la bande passante BGN (Band Gap Narrowing) qui réduit à travers l'augmentation de concentration intrinsèque ce qui influe par la réduction de la concentration de porteurs de charge minoritaires excédentaires, donc il faut changé la technologie pour atteindre le potentiel complète de champ électrique BSF. La technologie adoptée est l'hétérostructure, la barrière schottky formé par le métal (Au) et le SC ($p\text{-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) d'énergie élevé par rapport à celui de GaAs lui rend une solution optimale pour la formation du champ BSF, Le matériau qui combine bien avec l'Arséniure de Galium est l'AlGaAs de point de vue contacte métallurgique. Les résultats obtenues pour ce type des cellules solaires sont remarquables. Les cellules atteignent leur potentiel de conversion photovoltaïque, avec la possibilité d'utiliser cette technique pour la passivation de la surface avant de la cellule solaire afin d'améliorer le collecte pour les porteurs de charge photo généré par les radiations solaire de courtes longueurs d'ondes, car le SC AlGaAs a la possibilité d'être transparent aux rayonnements solaire à travers l'augmentation de fraction molaire X de l'Aluminium.

Références:

- [1] Andres Rydberg Hans Gronqvist et Erik Kollberg “Millimeter and Submillimeterwave Multipliers using quantum-barrier-Varactor diodes “, Edition IEEE Electron Device Letters, Vol. 11, N°9, pp. 373-375, septembre (1990).
- [2] Christophe Riviere, ‘mis en opération d’une source picoseconde de rayonnement infrarouge lointain’, thèse de doctorat présenté à la Faculté des études supérieures de l’université Laval, pp. 19-30, avril (1999).
- [3] E. Kollberg and A. Rydberg, “Quantum-barrier-Varactor diodes for high-efficiency millimetre-wave multipliers”, Electronics Letters, Vol. 25. N°25. pp 1696-1698. December (1989).
- [4] Emilien Peytavit, ‘génération et propagation aux fréquences Terahertz’, thèse de doctorat présenté à la Faculté des Sciences et technologie, l’université de Lille, pp. 3-16, soutenue le 24 octobre (2002).
- [5] Francis Lévy “ Physique et technologie de semiconducteur”. Edition Presses Polytechniques et universitaires romandes, pp 217-218 (1995).
- [6] G.W.J. Bennaker and Van-Heusen, “Semiconductor heterostructures and nanostructures”, Edition Eitrenreih and D. Turnbull Academic Press, Volume 4, pp 227-228 (1991).
- [7] G. Ghione, F. Bonani and P. Marco “High-Field Diffusivity and Noise Spectra in GaAs MESFET’s” Journal of Applied Physics, Vol.27, pp.365-375, (1994)
- [8] Henry Mathieu “Physique des semiconducteurs et des composants électroniques”, 4ème édition Masson, pp. 241-246 (1998).
- [9] Jean Pierre Colinge et Fernand Van De Wiele “Physique des dispositifs semiconducteurs”, Edition de Boeck-Wesmael, pp 110(1995).
- [10] J.P. Mackelvey “Solid State and Semiconductor”, Edition Harper international, pp 246 (1996).
- [11] J. Robert Joncs, B. Gregory Tais, H. Stephen Joncs, D. Scott Katzer “DC and Lange Signal Time Dependent Electron Transport in Heterostructure devices”, Edition IEEE Transactions on Electron Devices, Vol 42, N° 8, pp. 1393-1402, Aout (1995).
- [12] L. P. B. Katehi, G. M. Rebeiz, T. M. Weller, R. F. Drayton, H.-J. Cheng, J. F. Whitaker, “Micromachined Circuits for Millimeter and Sub-millimeter-Wave Applications”. IEEE Antennas and Propagation Magazine. Vol35, N°5, pp 9-17, October (1993).

- [13] L. Scharfetter and H. K. Gummel "Large-Signal Modelling of GaAs MESFET Operation" IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, Vol.30, pp.1817-1824, (1983).
- [14] P.N. Favennec "Implantation ionique pour la microélectronique et l'optique", Collection Technique ET Scientifique des Télécommunications, Edition Masson, pp 38 (1993)
- [15] R.S.Muller and T.I.Karmin "Device electronics for integrated Circuits", Edition J.Wiley and Sons, pp 130-141 (1986).
- [16] Alin Ricard * Photo piles solaire "presse polytechniques et universitaires romandes
- [17] Marc ORGRERET "Les Piles Solaires le composant e ses applications MASSON 1985
- [18] Oleksiy Nichiporuk "Simulation, Fabrication et analyse de cellule photovoltaïque à contacts arrières interdigités" instituts nationaux deS sciences Appliquées INSA de lyon 2005
- [19] Chenout hakini "optimisation du procédé technologique de réalisation d'une cellule solaire par la technique de diffusion" département d'électrotechnique université fr batna 2005
- [20] Urs Sarnuel Graf "single-chamber process development of microcrystalline silicon solar cells and high-rate deposited intrinsic layers" université de neuchâtel 2005
- [21] Jürgen Otto Schumacher "Numerical simulation of silicon solar cells with novel cell structures" solar energy system institute fraunhofer freiburg 2000
- [22] J, J, liou et Al "comparison and optimization of the performance of Si and GaAs solar cells" Solar Energy Materials and Solar cells 28(1992)9-28
- [23] Emmanuel Van Kerschaver et Al "Back-Contact Solar Cells" Prog: Photovoit: Res Apli 2006 14:107-123
- [24] J,J,liou "Advanced theory and modelling" Artech house (1994)
- [25] X.B.Xiang et Al "The study on high efficient AlGaAs/GaAs Solar cells" solar Energy Materials and Solar Cells 68(2001) 97-103
- [26] Aluminium Gallium Arsenide Basic parameters
www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/AlGaAs/index.html
- [27] R. P.Gale "High Efficiency Thin-Film AlGaAs-GaAs Double heterostructure" 0160-s371a8/0000-o446 1988JEE1.