

République Algérienne Démocratique et Populaire
Université ABOUBAKR BELKAÏD – TLEMCCEN

Faculté des Sciences

Département de Physique

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du
Diplôme de Licence en physique

Option : Energétique

• **ETUDE D'UNE CELLULE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE**
A HETEROJONCTION nCdS /pCdTe •

Présenté par:

M^{lle} BENZEGHADI HALIMA

M^{lle} OUDJAMAA NABAWIYA

Présidente du jury: Mr : A.BERRAYAH département de physique, MCA, Université
Tlemcen

Directrice de projet : Mme : D.GHAFFOUR département de physique, MAA,
Université Tlemcen

Examinatrice : Mme : S.GUERDJOURM département de physique, MAA, Université
Tlemcen

Examineurs : Mr : B. DALI -YOUCEF département de physique, MCB, Université
Tlemcen

Mr : B.LIANI département de physique, professeur, Université Tlemcen

Mr : R. SAIM département de physique, MCA, Université Tlemcen

Mr : M .LEMERINI département de physique, MCA, Université Tlemcen

Mr : A. BOUSSAID département de physique, MCA, Université Tlemcen

Le 6 juillet 2010

Année universitaire : 2009-2010

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE :

- [1]: site web / [www. TECHNOLOGIE. Fr](http://www.technologie.fr) /paramètres de fonctionnement des semiconducteurs.
- [2]: Site web / Fr. [Wikipedia.Org / wiki /semiconducteur](http://Wikipedia.Org/wiki/semiconducteur).
- [3]: Henry Mathieu«Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques de base» Edition «DUNOD».2004.
- [4] A.Saidan«Physique des semi-conducteurs » Tome II-La physique des composants électroniques de base. Edition : OPU .1993.
- [5]: Site web / fr [wikipedia.org / wiki / cellule photovoltaïque](http://wikipedia.org/wiki/cellule_photovoltaique).
- [6]: [http://www. Ef4. Be / fr / photovoltaïque expects. Techniques / cellules-photovoltaïques. Html](http://www.ef4.be/fr/photovoltaique_expectations_techniques_cellules_photovoltaiques.html).
- [7] : Site web /fr. [Wikipedia. Org / wiki / photoélectricité](http://Wikipedia.Org/wiki/photoelectricite).
- [8] : Site web / [www. Geri-int. Mins. Fr / fg / autres – fiches / cellule solaire 01.pdf](http://www.geri-int.mins.fr/fg/autres_fiches/cellule_solaire_01.pdf).
- [9] : Site web / [www.siemens solaire. Com](http://www.siemens-solaire.com).
- [10] : site web/[www. Photovoltaïque _ filière _ Google – liber fichier](http://www.photovoltaique_filiere_google-liber_fichier).
- [11] : S.M Sze « physics of semiconductor devices » Edition : Wiley – Interscience publication. 1981.

CHAPITRE 2

LA CELLULE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE

2-1 Définition de la cellule photovoltaïque : [5]

C'est l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est fonction de la lumière incidente. L'électricité produite est fonction de l'éclairement.

La cellule photovoltaïque produit un courant continu

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semiconducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semiconducteurs tels que le sulfure de cadmium (CdS), et le tellure de cadmium (CdTe) ect...

Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques, rondes ou carrées, d'une dizaine de centimètres de côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques (ou "panneaux solaires"), en fonction de la puissance recherchée.

2-2 Les types de cellules : [6]

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N et utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semiconducteur.

On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et polycristallin. Ces dernières ont un rendement inférieur par rapport aux premières, mais ont un coût de fabrication moins élevé.

Les couches minces (thinfilms) constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque. Dans cette génération, on distingue le silicium amorphe (-Si), le diséléniure de cuivre indium (CIS), le tellure de cadmium (CdTe).

La troisième génération vise à passer la limite maximale de rendement des cellules actuelles qui est d'environ 30%. Plusieurs concepts sont envisagés pour atteindre cet objectif :

- Superposition de multiples cellules (utilisant des bandes d'énergie différentes), cellules à concentration.

- Utilisation des photons à basse énergie qui ne sont habituellement pas absorbés par la cellule.

2-3 Fonctionnement d'une cellule solaire :

Le fonctionnement des cellules solaires est basé sur l'effet photovoltaïque, en effet elles permettent la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique. La cellule solaire se compose de plusieurs couches minces,

(figure 2-1) :

- Une couche de protection translucide (verre).
- Une couche conductrice aussi translucide que possible.
- Une couche N avec porteurs de charges libres négatifs (électrons).
- Une couche P avec porteurs de charges libres positifs (trous).
- Une couche de contact conductrice en métal.
- Une couverture à l'arrière pour la protection contre les influences externes.

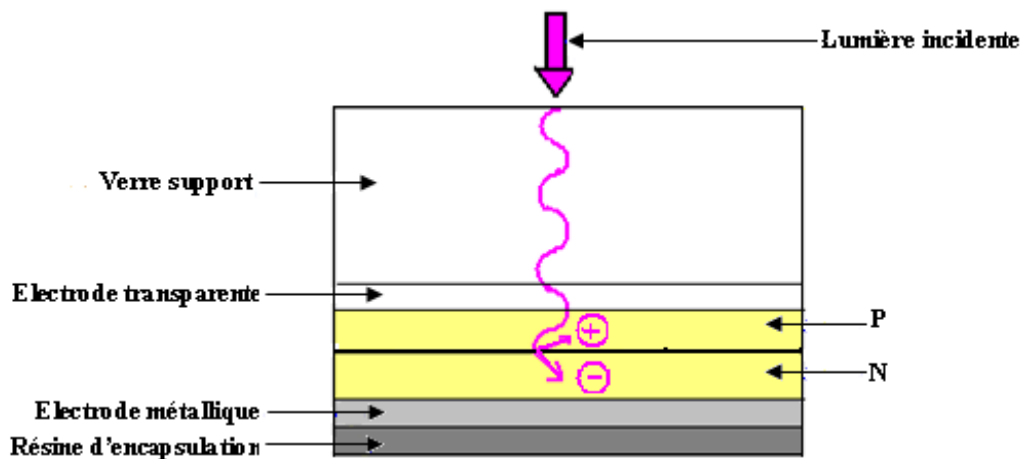


Figure (2-1) Représentation d'une cellule solaire amorphe.

Grâce à cette structure en couches bien déterminées, la cellule parviendra à moduler le rayonnement solaire en énergie électrique.

2-4-Principe de fonctionnement :

Il peut être illustré par l'exemple suivant, qui présente le cas d'une cellule au silicium :

La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence supérieure dans la classification périodique.

Le silicium possède 4 électrons de valence.

Dans la colonne 15, par exemple le phosphore (P), peut doper le silicium. Il s'agit d'un semiconducteur de type N.

Il peut s'agir du bore (B) ou d'un autre élément de la colonne 13, comme dopant, il s'agit alors d'un semiconducteur de type P.

Lorsqu'on met ces deux semiconducteurs en contact (de manière à ce qu'il puisse y avoir conduction), on crée une jonction PN, qui doit permettre le passage des électrons entre les deux plaques.

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque, exposée à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron, créant rapidement un trou pour le remplacer, et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée (figure 2-2). Le

principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de s'y recombiner.

Ainsi, il apparaîtra une tension entre les deux faces, comme une pile. Pour cela, on s'arrange pour créer un champ électrique permanent en moyen d'une jonction P-N.

En fonctionnement, quand un photon arrache un électron à la matrice, créant un électron libre et un trou, sous l'effet de ce champ électrique ils partent chacun à l'opposé : les électrons s'accumulent dans la région N (qui devient le pôle (-)) tandis que les trous s'accumulent dans la couche dopée P (qui devient le pôle (+)).

La Z C E étant très mince, on donne à la cellule une faible épaisseur.

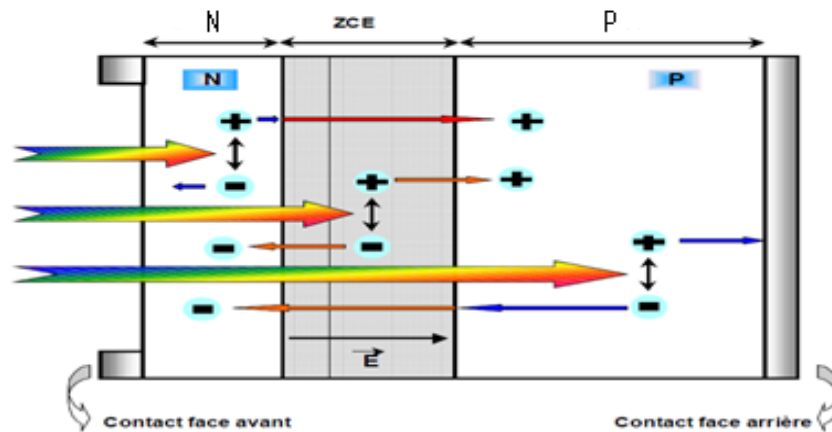


Figure (2-2) Principe de la photodiode.

2-4-1- Caractéristiques :

Fermée sur une résistance R_{ch} , lorsque l'on éclaire la jonction P-N, on observe l'apparition d'un courant inverse I sous une tension en sens direct V . La jonction fonctionne en photo pile.

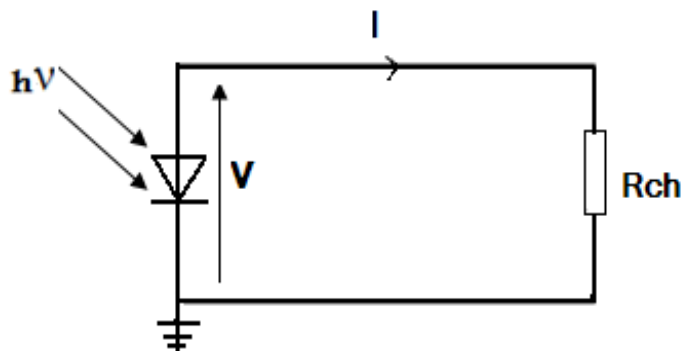


Figure (2-3) Schéma d'application.

La caractéristique d'une cellule solaire non éclairée est celle d'une diode. En présence d'un éclairement, cette caractéristique est décalée vers le bas d'un courant I_{cc} (courant de court-circuit).

De même elle coupe l'axe des abscisses en V_{co} (tension de circuit ouvert). La droite de charge indique le point de fonctionnement. [8]

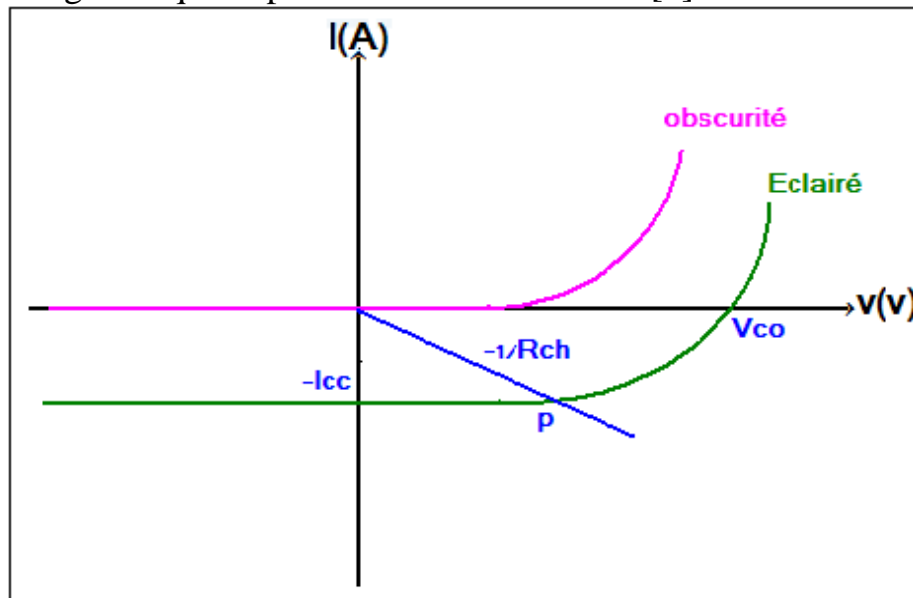


Figure (2-4) Caractéristique d'une jonction P N non éclairée puis éclairée.

2-5 les paramètres des cellules solaires:[9]

On définit quatre grandeurs caractéristiques principales de fonctionnement des cellules solaires qui sont :

2-5-1-Le courant de court- circuit I_{cc} :

On obtient le courant de court circuit lorsque la tension est nulle ($V=0$). Il est défini par la quantité des paires électron- trou G créées, qui traversent la jonction sans recombinaison entre les longueurs de diffusion des électrons et des trous (L_n et L_p) respectivement :

$$I_{cc} = qG(L_n + L_p) \quad (2-1)$$

2-5-2 : La tension de circuit ouvert V_{co} :

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

$$V_{co} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_0} + 1\right) \quad (2-2)$$

Où I_0 est le courant de saturation de la diode déterminant le nombre de porteurs collectés thermiquement à l'obscurité.

2-5-3 Facteur de forme FF :

Il représente l'efficacité d'une cellule solaire.

Il est défini par le rapport de la puissance maximale P_m à la valeur du produit ($I_{cc} \cdot V_{co}$).

Les grandeurs V_m , I_m , V_{co} , et I_{cc} de la caractéristique courant –tension sont représentées par la (figure2-5).

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (2-3)$$

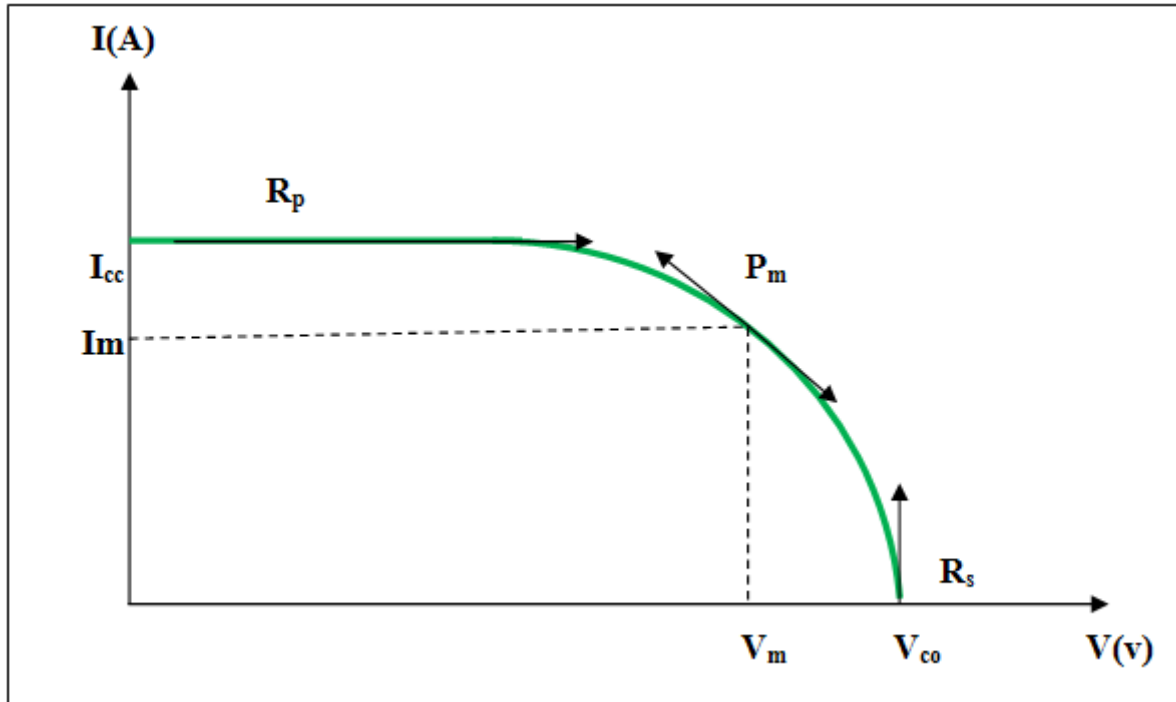


Figure (2-5) Les points remarquables et les valeurs de la caractéristique courant-tension d'une photopile fonctionnant en générateur de puissance. V_m et I_m sont les tensions et courants maximaux pour une puissance maximale P_m .

2-5-4 Le rendement de conversion d'énergie η :

Le rendement de conversion η d'une cellule solaire dépend essentiellement de l'ensemble des paramètres importants cités précédemment, à savoir

(I_{cc} , V_{co} , et FF), et de la puissance du rayonnement solaire incident P_0 qui est égal à la surface par le flux ($P_0 = \Phi S$). η est donné par l'expression suivante :

$$\eta = FF \frac{I_{cc} V_{co}}{P_0} = \frac{P_m}{P_0} = \frac{I_m V_m}{\Phi S} \quad (2-4)$$

2-6 Modélisation d'une cellule solaire :

2-6-1 Cas idéal :

Dans le cas idéal, I_{cc} est le nombre de porteurs photogénérés, ie courant I est de la forme suivante :

$$I = I_D - I_{cc} = I_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) - I_{cc} \quad (2-5)$$

Le circuit équivalent correspondant est donc :

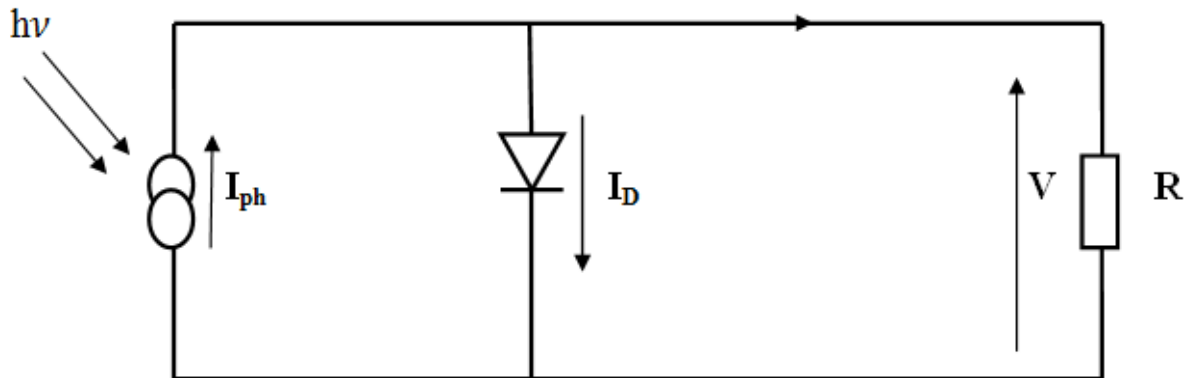


Figure (2-6) Schéma équivalent d'une cellule solaire idéale.

Où I et V sont respectivement le courant et la tension fournis par la cellule.

I_D : est le courant de diode donné par l'équation suivante :

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2-6)$$

2-6-2 Cas réel :

Dans ce cas, les performances des cellules solaires sont limitées par différentes pertes d'énergie.

Ces pertes sont liées aux paramètres physiques de la cellule photovoltaïque. Elles sont assimilables à deux résistances.

2-6-2-1 Résistance série R_s :

Elle est due aux pertes par effet joule du courant fourni par la cellule à travers les grilles de collecte, et dépend de la nature de ces grilles et de leurs formes géométriques, ainsi que des procédés technologiques de métallisation.

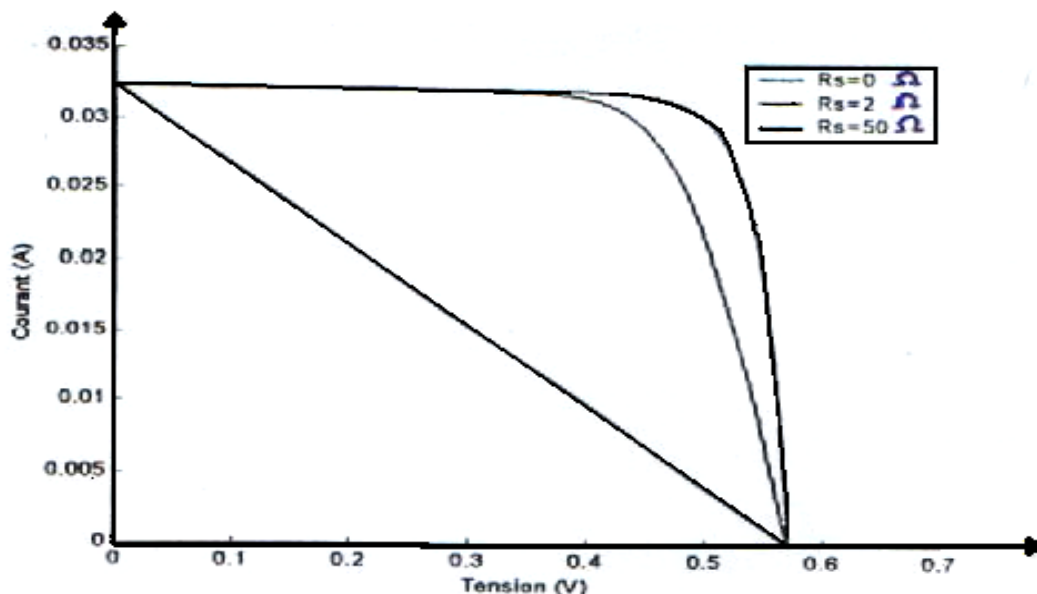


Figure (2-7) Effet de la résistance série R_s sur la caractéristique courant-tension.

La résistance série est calculée: soit à partir de la pente de la caractéristique courant –tension sous les conditions de circuit ouvert ($V=V_{co}$).

$$R_s = -\left(\frac{\partial V}{\partial I}\right)_{V=V_{co}} \quad (2-7)$$

Soit par la relation suivante :

$$R_s = \frac{V_{co} V_m}{I_{cc} I_m} \quad (2-8)$$

I_m et V_m représentent les coordonnées du point de fonctionnement à puissance maximale P_m .

2-6-2-2 Résistance parallèle R_p :

La résistance parallèle ou (shunt) caractérise les pertes par recombinaison dues aux épaisseurs des régions N et P et de la ZCE.

R_p est liée directement au processus de fabrication, à l'existence de défauts de structure et aux états de surface.

R_p affecte aussi la caractéristique $I = f(V)$, son influence est très importante pour les faibles niveaux de polarisation (au voisinage de I_{cc}).

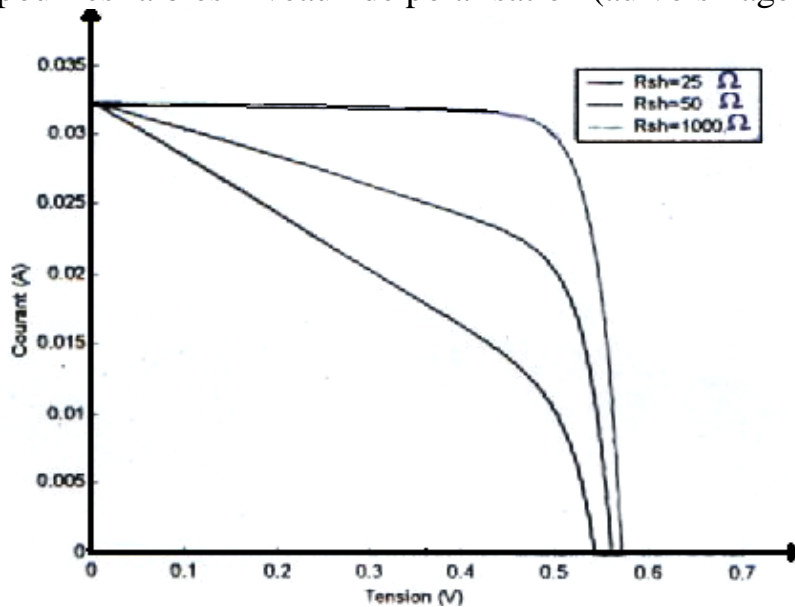


Figure (2-8) Effet de la résistance parallèle R_p sur la caractéristique courant-tension.

La résistance parallèle est due aux courants de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée, par la relation suivante :

$$R_p = -\left(\frac{\partial V}{\partial I}\right)_{I_{cc}} \quad (2-9)$$

Ces deux résistances modifient légèrement la forme de la caractéristique

$I = f(V)$, de la cellule solaire, elle devient :

$$I = I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_s I)}{kT}} - 1 \right) + \frac{V+R_s I}{R_p} - I_{cc} \quad (2-10)$$

Le schéma équivalent de la cellule solaire réelle est donné par le montage électrique suivant :

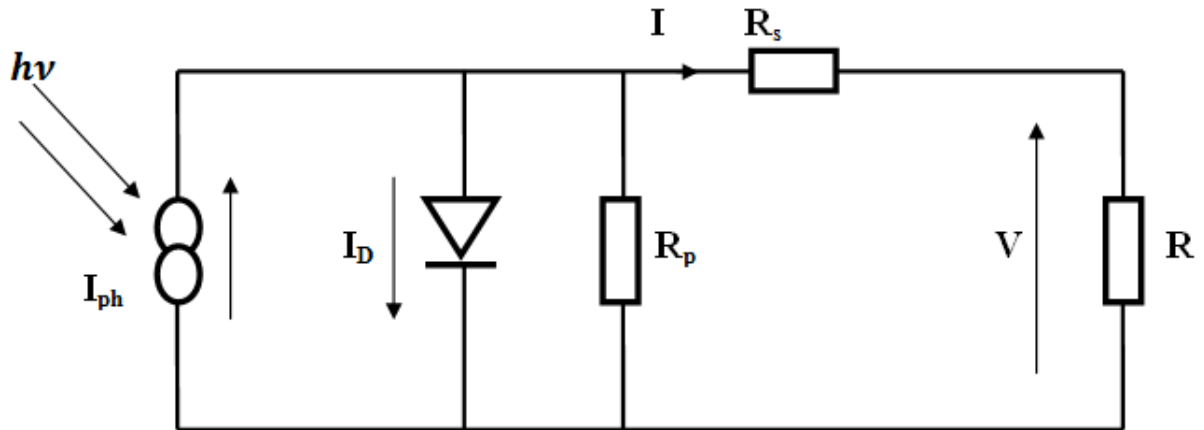


Figure (2-6) Schéma équivalent d'une cellule solaire réelle.

2-7 CONCLUSION :

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les paramètres essentiels d'une cellule solaire ainsi que la modélisation d'une cellule solaire. Ensuite nous avons étudié l'effet des résistances série et parallèle sur la modélisation.

CHAPITRE 3

*Etude et analyse
d'une cellule solaire à
hétérojonction CdS\CdTe*

3-1 Introduction :

Une hétérojonction est définie comme la jonction entre deux semiconducteurs de nature et de largeur de bandes interdites différentes. Dans une hétérojonction idéale les deux semiconducteurs ont la même constante de réseau et le même coefficient d'expansion thermique. Dans une hétérojonction réelle, par contre, ces deux dernières conditions ne sont jamais satisfaites. Il en résulte un certain nombre de défauts de structure à l'interface entre les deux semiconducteurs. Ces défauts jouent un rôle important dans les propriétés électriques de l'hétérojonction.

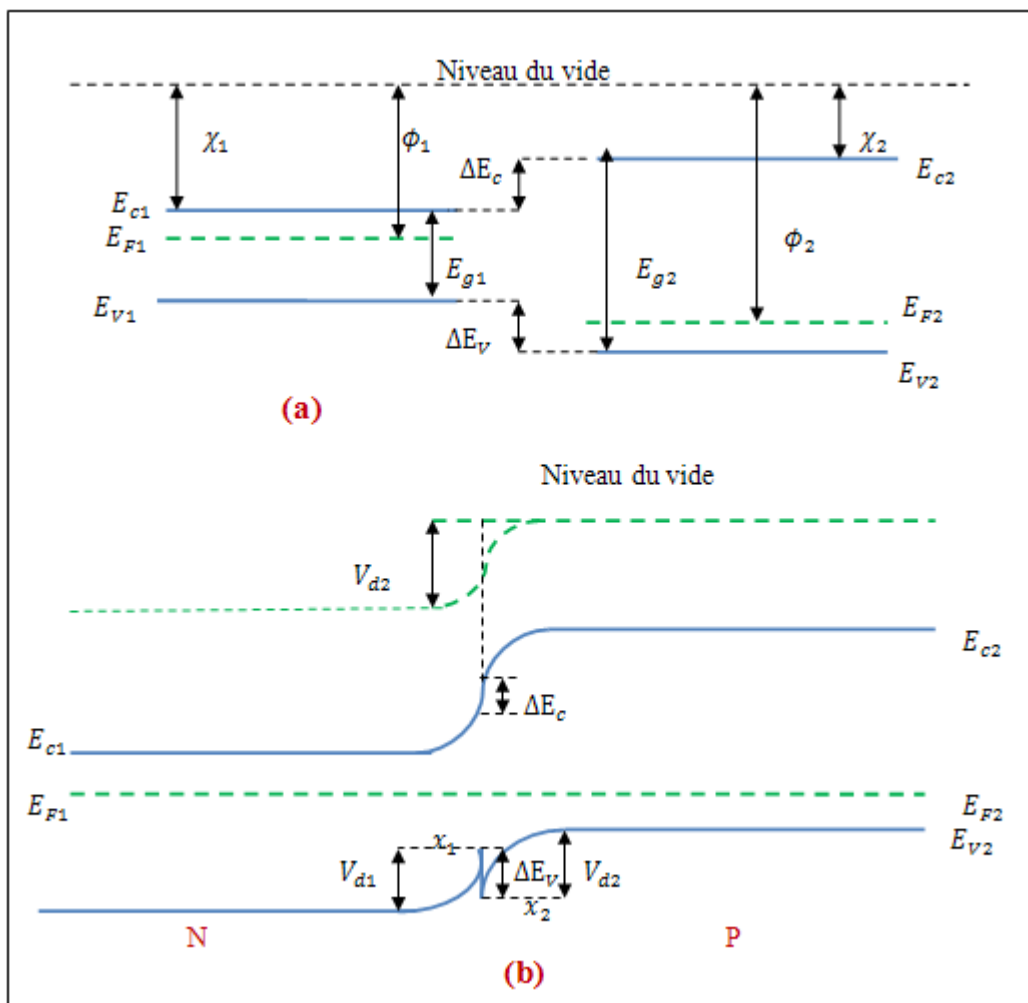


Figure (3-1) Structure énergétique d'une hétérojonction N-P idéale :
a) Avant contact. b) Après contact.

La figure (3-1) montre la structure énergétique d'une hétérojonction N-P abrupte idéale à l'équilibre thermique. Elle résulte du contact entre un semiconducteur de type N de faible largeur de bande interdite et un autre semiconducteur de type P de largeur de BI plus grande, figure (3-1-a).

E_c et E_v représentent les discontinuités de la bande de conduction et de valence, respectivement. Ces discontinuités changent avec la nature de l'hétérojonction N-P, N-N et les largeurs des bandes interdites.

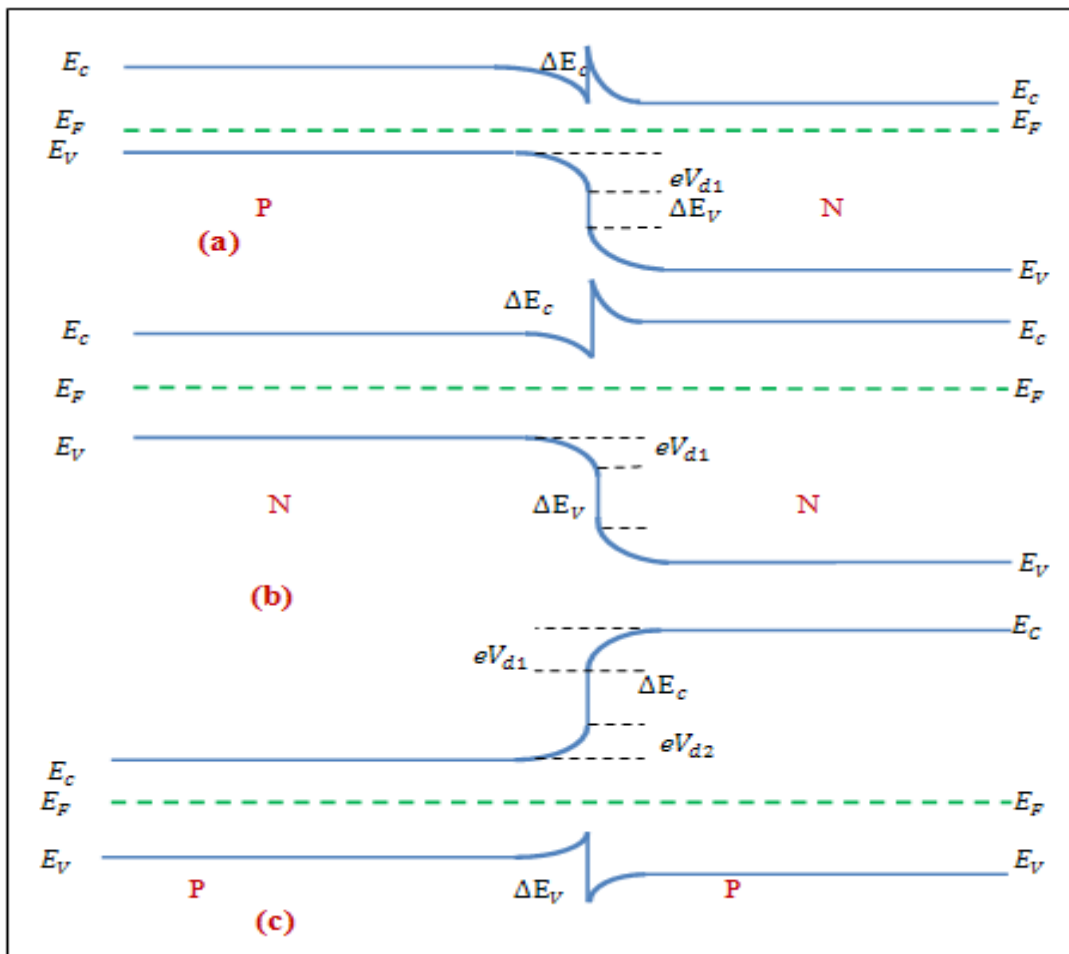


Figure (3-2) Structure énergétique d'une hétérojonction idéale à l'équilibre thermique : a) De type P-N b) De type N-N c) De type P-P

La figure (3-2) montre les différents cas d'hétérojonction. Le mécanisme de transport électronique dans une hétérojonction dépend, des discontinuités E_c et E_v , (si la barrière devant les électrons est plus haute que celle devant les trous,

le courant d'hétérojonction sera dû principalement aux trous), de la densité de défauts de génération (si cette densité est grande, le phénomène de génération-recombinaison à l'interface domine le courant total à travers l'hétérojonction), et du dopage des deux semiconducteurs.

Dans chaque type d'hétérojonction, le potentiel de diffusion V_d est la somme des potentiels de diffusion partiels V_{d1} et V_{d2} dans chaque semiconducteur, figure (3-1-b).

La zone de charge d'espace qui apparaît à l'interface s'étend de part et d'autre dans chaque semiconducteur. La distribution du potentiel à l'intérieur de cette zone et le champ électrique associé peuvent être calculés de la même manière que pour l'homojonction P-N. En effet pour une hétérojonction P-N abrupte idéale, la largeur de la ZCE et la capacité sont obtenues en résolvant l'équation de Poisson et en tenant compte de la discontinuité du champ électrique à l'interface.

3-2 Détermination du champ électrique E, du potentiel de diffusion V_d et de la largeur de la ZCE :

Considérons une hétérojonction P-N comme indiquée sur la figure (3-3) sans polarisation.

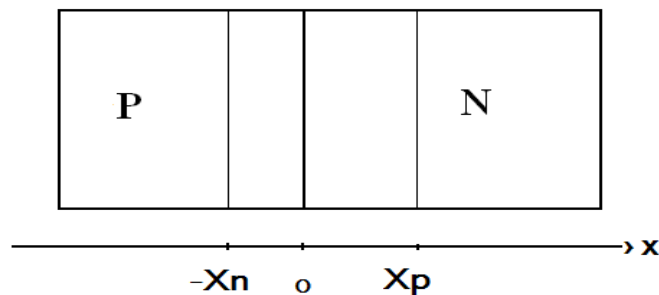


Figure (3-3) Hétérojonction P-N

Intéressons-nous au calcul du champ électrique E, du potentiel de diffusion V_d et à la largeur de la ZCE pour un profil de dopage abrupt.

- $\rho(x) = 0$ $x < -x_p$
 - $\rho(x) = -q N_a$ $-x_p < x < 0$
 - $\rho(x) = +q N_d$ $0 < x < x_n$
 - $\rho(x) = 0$ $x_n < x$
- (3-1)

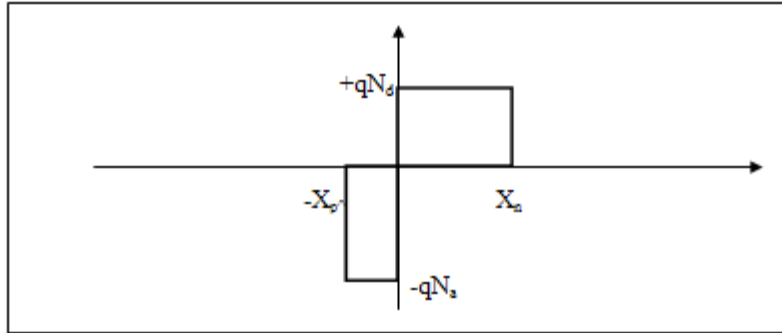


Figure (3-4) densité de charge.

Commençons par l'équation de Poisson $dE/dx = \rho/\epsilon_s$ avec :

$$\rho = q [\rho(x) - n(x) + N_d^+(x) - N_a^-(x)] \quad (3-2)$$

Et l'équation de Poisson devient :

$$\triangleright (dE/dx) = -(qN_a/\epsilon_{sp}) \quad -x_p \quad x \quad 0 \quad (3-3)$$

$$\triangleright (dE/dx) = +(qN_d/\epsilon_{sn}) \quad 0 \quad x \quad x_n \quad (3-4)$$

Et :

$$\mathbf{E} = \mathbf{0} \quad \text{quand} \quad x = -x_p \quad \text{et} \quad x = x_n$$

En passant à l'intégration :

$$\int_0^{E(x)} dE = \frac{-qN_a}{\epsilon_{sp}} \int_{-x_p}^x dx$$

$$\int_{E(x)}^0 dE = \frac{+qN_d}{\epsilon_{sn}} \int_x^{x_n} dx$$

On aura :

$$\triangleright \mathbf{E}(x) = -(qN_a/\epsilon_p) (x + \epsilon_p) \quad -x_p \quad x \quad 0 \quad (3-5)$$

$$\triangleright \mathbf{E}(x) = -(qN_d/\epsilon_n) (x_n - x) \quad 0 \quad x \quad x_n \quad (3-6)$$

$$\text{En } x=0 \quad k_p E(0^-) = k_n E(0^+)$$

$$N_a x_p = N_d x_n \quad (3-7)$$

Donc l'allure du champ électrique est représentée par la figure (3-5). On remarque la discontinuité de E au niveau du contact (x=0) ceci est dû à la différence de permittivité des deux S C.

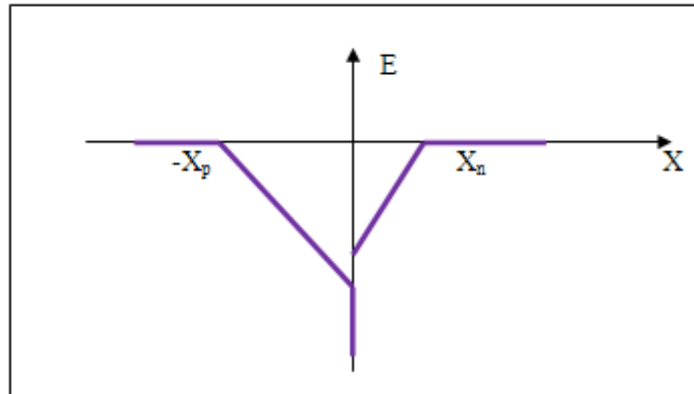


Figure (3-5) Champ électrique E

Et pour trouver le potentiel V(x).

On a $\frac{dV(x)}{dx} = -E(x)$

En intégrant (3-5) et en posant que $V(-x_p)=0$ on obtient:

$$\int_0^{V(x)} dV = \frac{qN_a}{\epsilon_{sp}} \int_{-x_p}^x (x + x_p) dx$$

Alors :

$$V(x) = \frac{qN_a}{\epsilon_{sp}} (x + x_p)^2 \quad -x_p < x < 0 \quad (3-8)$$

soit que $V(x_n)=V_d$ et en intégrant (3-6).

$$V(x) = V_d - \frac{qN_d}{2\epsilon_{sp}} (x_n - x)^2 \quad 0 < x < x_n \quad (3-9)$$

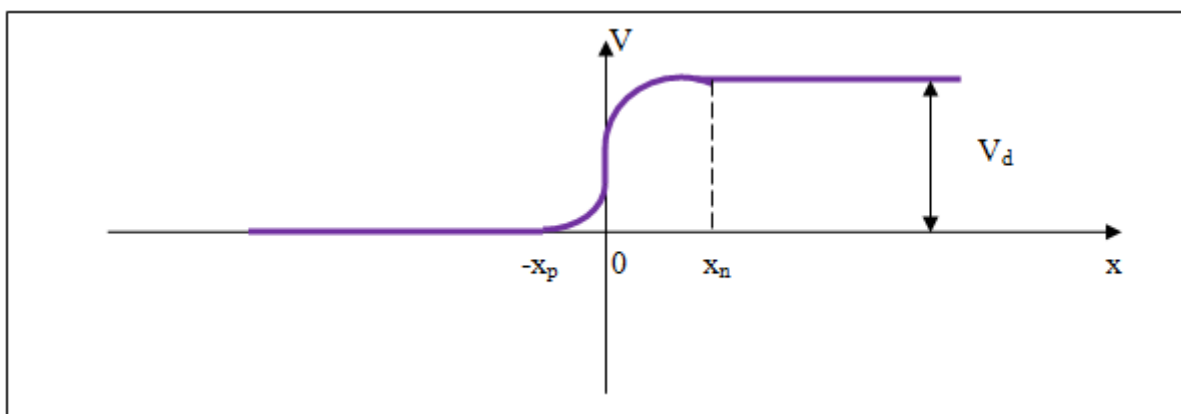


Figure (3-6) Potentiel V(x).

En $x = 0$, (3-8) = (3-9) $V(0^-) = V(0^+)$

On obtient:

$$\frac{qN_a x^2}{2\epsilon_{sp}} = V_d - \frac{qN_d x_n^2}{2\epsilon_{sn}} \quad (3-10)$$

10)

De (3-10) nous trouvons la largeur ZCE :

$$\Rightarrow x_p = \sqrt{\frac{2k_p k_n \epsilon_0 N_d V_d}{qN_a (N_a k_p + N_d k_n)}} \quad (3-11)$$

$$\Rightarrow x_n = \sqrt{\frac{2k_p k_n \epsilon_0 N_a V_d}{qN_d (N_a k_p + N_d k_n)}}$$

Avec $\epsilon_{sp} = k_p \epsilon_0$ et $\epsilon_{sn} = k_n \epsilon_0$

Finalement:

$$W = x_p + x_n$$

D'où:

$$W = \frac{2k_p k_n \epsilon_0 (N_a^2 + N_d^2) V_d}{qN_d N_a (N_a k_p + N_d k_n)} \quad (3-13)$$

3-3 La filière CdS / CdTe :

3-3-1 Introduction :

Dans la filière polycristalline, deux options se détachent nettement depuis quelques années par leurs performances et leur simplicité de mise en œuvre : la filière CdTe et la filière CuInSe₂, (et sa variante Cu (In, Ga) Se₂ encore dénommée (CIGS), toutes deux le plus souvent associées à une couche fenêtre au CdS. [10]

3-3-2 Historique :

Les premières cellules au CdTe ont été réalisées au Batelle Institut de Francfort, dès 1972. Les propriétés des films de CdS et de CdTe sont maintenant bien connues des chercheurs.

Jusqu'à une date récente, il était admis que la filière au CdS / CdTe représentait l'approche la plus prometteuse pour la conversion photovoltaïque terrestre. La valeur du gap du CdTe de 1,45 eV, est idéalement adaptée au spectre solaire et son très grand coefficient d'absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbée sur une profondeur de $2\mu\text{m}$, autorisant ainsi l'utilisation de matériaux relativement impurs dont la longueur de diffusion des porteurs minoritaires ne dépasse pas quelques μm . [10]

3-3-3 Toxicité :

Les problèmes d'environnement associés à l'utilisation du cadmium limitent les tentatives de développement de cette filière. Pourtant, le Cd est un élément déjà utilisé dans l'industrie. Il est produit à partir de l'extraction du zinc, à raison de 20000 tonnes/an. Jusqu'à une date récente, il était très utilisé comme pigment des peintures rouges, et comme stabilisant pour le PVC.

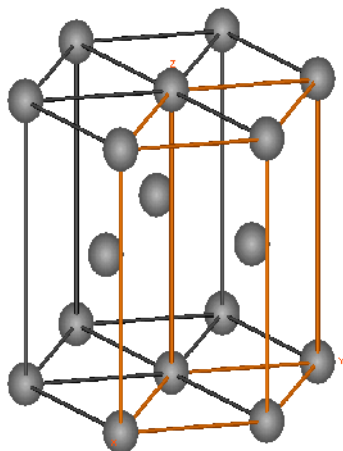
L'élément Cd présente une toxicité certaine quand on s'y trouve exposé de façon chronique. Mais CdS et CdTe ne sont pas solubles dans l'organisme, CdTe en particulier est un composé extrêmement stable qui ne présente pas de toxicité sous cette forme. Le produit fini sous forme de module encapsulé ne présente donc aucun danger, même en cas d'incendie. [10]

3-4 Le tellure de cadmium CdTe et le sulfure de cadmium CdS:

- *Quelques propriétés du CdS et CdTe : [11]*

	CdS	CdTe
Structure	Hexagonale (figure 3-7)	Cubique Zinc- blende (figure 3-7)
Paramètre de maille	5,8330Å	6,4805 Å
Conductivité thermique (à 25°C)	0,2W/cm K	0,06W/cm K
Coefficient d'absorption ($\lambda=10,6 \mu\text{m}$)	$\leq 0,007\text{cm}^{-1}$	$\leq 0,003\text{cm}^{-1}$
Indice de réfraction ($\lambda=10,6 \mu\text{m}$)	2,2	2,69

Hexagonale



Zinc-blende

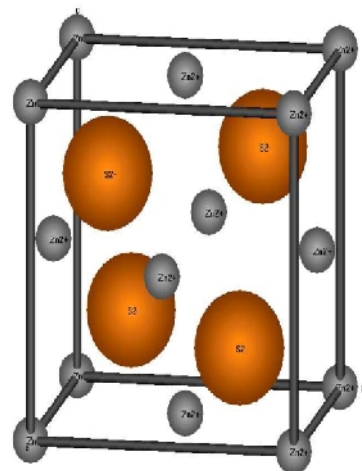


figure (3-7) Structures cristallines du CdS et CdTe.

- *Masses effectives des électrons et extrêmas des bandes. Paramètres caractéristiques de la bande de valence :*

Semiconducteur	Masse effectives Des électrons m_e/m_0		Paramètres de la bande de valence			Masse effectives des Trous m_h/m_0	
	m_1/m_0	m_t/m_0	1	2	3	m_{hh}/m_0	m_{lh}/m_0
CdS	0,16	0,16	-	-	-	5,0	0,70
CdTe	0,09	0,09	5,29	1,89	2,46	1,38	0,103

- *Energie du gap des différents semiconducteurs :*

Semiconducteur	Gap à 4 K (eV)	Gap à 300 K (eV)	Nature de gap	Constante diélectrique relative $k = \epsilon / \epsilon_0$
CdS(h)	2,56	2,42	Direct	9,4
CdTe	1,60	1,44	Direct	9,6

- *Affinités électroniques des semiconducteurs e (eV). (Milnes A.C-1972 et Sasaki A 1984), valeurs maximales des travaux de sortie e_{max} (eV) :*

S.C	CdS	CdTe
q	4,5	4,28
q_{max}	6,92	5,76

3-5 Cellule solaire à hétérojonction CdS / CdTe :

3-5-1 Introduction : [10]

CdTe est potentiellement l'un des matériaux les plus intéressants pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire :

- ✓ Par sa largeur de bande interdite de 1,5 eV qui le place au maximum de la courbe de rendement théorique (24%).
- ✓ Par le fait qu'il peut être obtenu de type N ou P par dopage avec des impuretés étrangères.

- ✓ Par la valeur élevée de son coefficient d'absorption optique dans la bande fondamentale qu'autorise l'utilisation de couches de faibles épaisseurs (1 à 3 μm).
- ✓ Par le fait qu'il se prête, comme la plupart des composés II – VI à la réalisation de couches minces de bonnes caractéristiques électriques et photoélectriques, vraisemblablement en raison de son caractère ionique.

Le semiconducteur CdTe est la zone active de l'hétérojonction CdS / CdTe où est générée la majorité des porteurs minoritaires excédentaires.

Le CdS qui est le sulfure de cadmium est l'émetteur, il joue le rôle de fenêtre avec une épaisseur beaucoup plus petite que celle du CdTe.

3-5-2 l'hétérojonction CdS / CdTe :

Comme le montre figure (3-8), la plupart des cellules au CdTe utilisent en superstrat une couche de CdS de type N, dont le gap très élevé, de 2,4 eV, lui permet d'agir comme fenêtre d'entrée de la lumière (pas d'activité photoélectrique) et comme barrière de potentiel (hétérojonction CdS / CdTe). En tant que partenaire de type N du CdTe de type P, le CdS a été utilisé dès 1970 dans les premières cellules solaires. La couche fenêtre a en général une épaisseur de quelques dixièmes de micromètres

Le procédé de fabrication nécessite qu'au moins une étape se fasse à plus de 400 °C, qu'il s'agisse du dépôt de CdTe ou du recuit postérieur indispensable. Au-dessus de 450°C, le composé est un solide extrêmement stable. En effet, la matière condense de façon stœchiométrique tant que le substrat est maintenu au-dessus de cette température. Dans ce procédé haute température, les films sont en général naturellement de type P avec une concentration de porteurs P inférieure à 10^{15} cm^{-3} .

Il est remarquable que CdS et CdTe puissent être déposés en utilisant les mêmes techniques.

La dernière étape est la formation de l'électrode arrière.

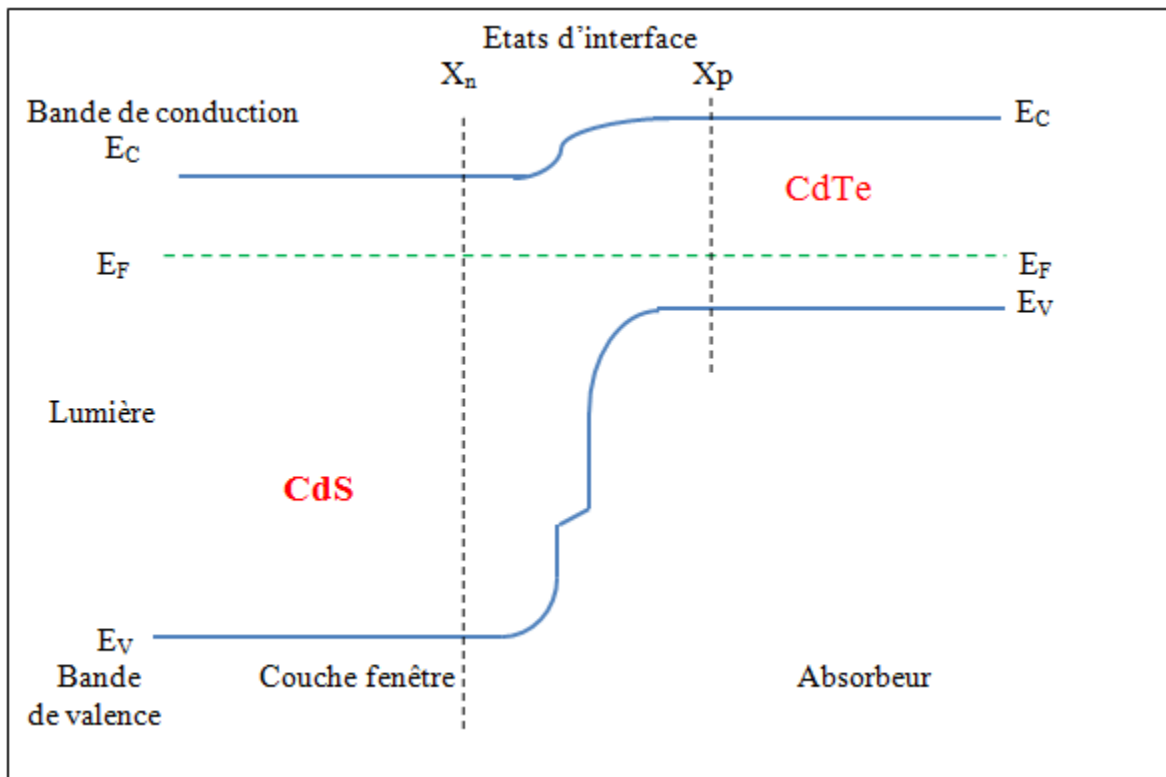


Figure (3-8) Schéma des bandes dans l'hétérojonction CdS/CdTe.

Sous illumination, les porteurs sont surtout générés dans la ZCE du CdTe de type P. Donc la collecte des porteurs se fait par le champ plutôt que par la diffusion. Comme il n'ya presque pas de ZCE dans le CdS qui est fortement dopé et parce que la durée de vie des porteurs minoritaires y est très courte, la couche CdS est en fait une couche morte du point de vue photovoltaïque. Il est souhaitable de minimiser son épaisseur pour réduire les pertes d'absorption optique.

3-5-3 Cellule solaire au CdS /CdTe :

La figure (3-9) montre la structure de la cellule solaire. Elle consiste en une hétérojonction **n-CdS /p-CdTe**. Le CdS de type N est déposé sur le verre couvert d'une couche d'OTC (oxyde transparent conducteur) tel que Ln_2O_3 ou SnO_2 .

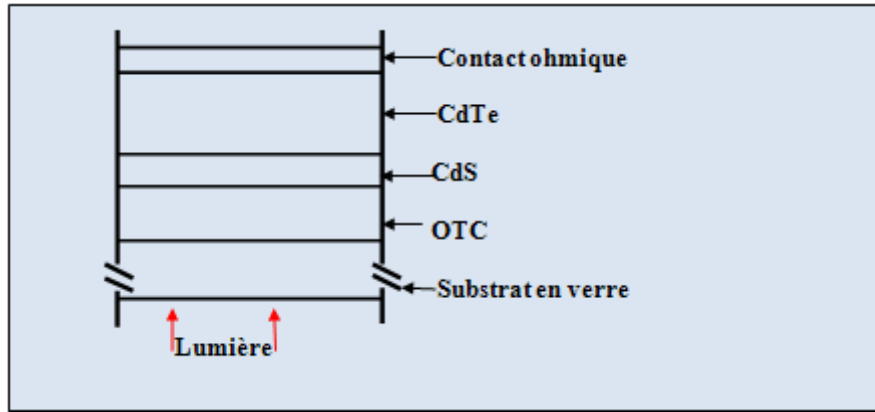


Figure (3-9) Structure d'une cellule de base au CdS / CdTe.

3-6 Etude d'une cellule solaire à hétérojonction n CdS/p CdTe :

On se propose de calculer les grandeurs principales d'une cellule solaire photovoltaïque à hétérojonction n CdS/p CdTe à la température ambiante $T=T_0=300K$.

La plaquette de surface $S=50\text{ cm}^2$ est exposée à un rayonnement incident $\Phi = 270\text{ W/m}^2$.

La tension maximale $V_m=0.72V$.

Nous avons pris une densité de courant de saturation $J_0=2 \cdot 10^{-12}\text{ A/m}^2$.

3-6-1 Calcul du courant de saturation I_0 :

On peut calculer le courant de saturation I_0 par la relation suivante :
 $I_0 = J_0 S$

$$I_0 = 2 \cdot 10^{-12} \cdot 50 \cdot 10^{-4}\text{ A}$$

$$I_0 = 10^{-14}\text{ A}$$

3-6-2 Calcul du courant maximal I_m :

La puissance fournie par la pile est donnée par le produit suivant :

$$P = V \cdot I$$

Cette puissance est maximale au point P_m , définie par : $\frac{dP}{dV} = 0$

$$V \left| I_0 \left(\frac{q}{kT_0} \right) \exp(qV/kT_0) \right| + I_0 [\exp(qV/kT_0) - 1] - I_{ph} = 0$$

Alors :

$$I_0 + I_{ph} = I_0 \exp(qV_m/kT_0) [1 + (q/kT_0)V_m]$$

Tirons alors la valeur de I_m à V_m :

$$I_m = -I_0 \left(\exp\left(\frac{qV_m}{kT_0}\right) - 1 \right)$$

AN :

$$I_m = -10^{-14} (1,0720026) \exp(1,0720026)$$

$$I_m = -0,29 A$$

3-6-3 Calcul du courant de photon I_{ph} :

$$I_{ph} = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT_0}\right) - 1 \right] - I_m$$

AN :

$$I_{ph} = 10^{-14} [\exp(1,0720026) - 1] - (-0,29)$$

$$I_{ph} = 0,30 A$$

3-6-4 Calcul de la tension de circuit ouvert V_{co} :

Quand $I=0$:

$$V = V_{co} = \left[\left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) + 1 \right]$$

AN :

$$V_{co} = \left(\frac{0,026}{1} \right) \ln [(0,30 \cdot 10^{-14}) + 1]$$

$$V_{co} = 0,806 V$$

3-6-5 Calcul de la puissance maximale :

La puissance maximale débitée par cette cellule est donnée par le produit $V_m I_m$, est :

$$P_m = I_m \cdot V_m$$

AN :

$$P_m = 0,29 \cdot 0,72$$

$$P_m = 0,21 W$$

3-6-6 Le facteur de forme :

$$FF = V_m \cdot I_m / V_{co} \cdot I_{cc}$$

$$FF = 0,21 / 0,24$$

AN:

$$FF = 0,875$$

3-6-7 Le rendement de conversion η :

$$\eta = V_m \cdot I_m / \phi \cdot S$$

$$P_0 = \phi \cdot S$$

$$P_0 = 270 \cdot 5010^{-4}$$

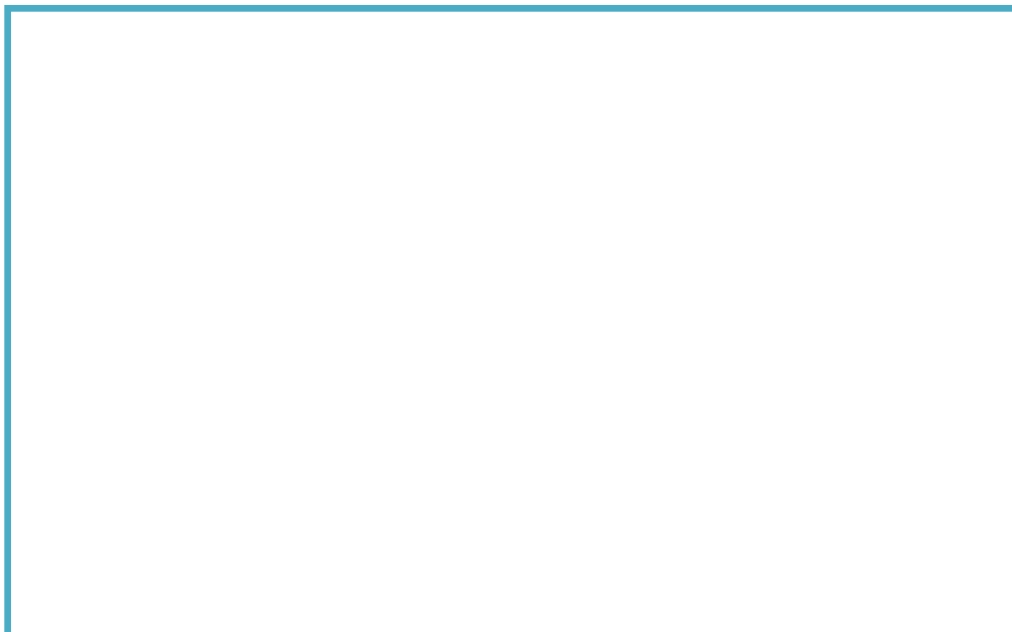
$$P_0 = 1,35 \text{ W}$$

$$\eta = 0,21 / 1,35$$

$$\eta = 0,155$$

$$\eta = 15,5\%$$

3-6-8 Tracé de la caractéristique $I = f(V)$ sous éclairement :



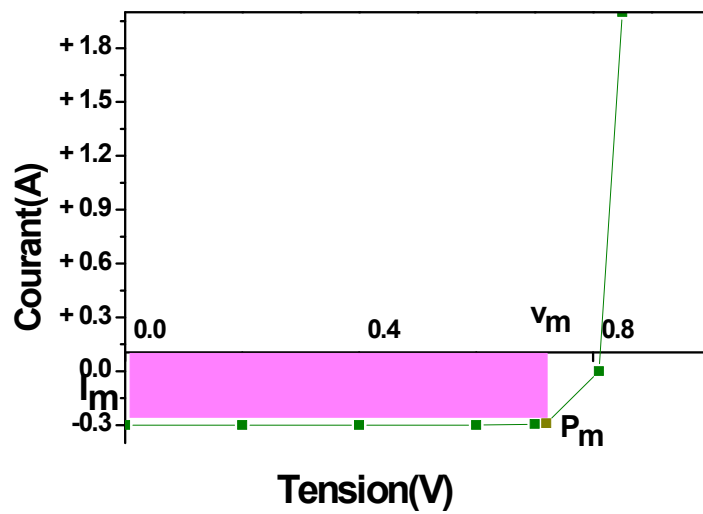


Figure (3-10) Caractéristique d'une cellule solaire à hétérojonction CdS/CdTe sous éclairnement.

3-7 Conclusion :

Nous avons dans ce chapitre, introduit la notion d'hétérojonction qui nous a servi à étudier une cellule solaire au CdS/CdTe. Nos calculs ont abouti à un rendement de conversion égal à 15.5%, comparé au rendement de cellules au silicium amorphe qui est de 5 à 10%, il est meilleur.

CHAPITRE 1

LES SEMICONDUCTEURS ET LA JONCTION P N

1-1-Définition des semiconducteurs :

Les semiconducteurs sont des corps cristallins dont les propriétés de conductibilité électrique sont intermédiaires entre celles des métaux et celles des isolants.

Les semiconducteurs sont des isolants parfaits au zéro absolu.

Si on augmente la température, les électrons se libèrent de leurs liaisons covalentes et se déplacent à travers la structure cristalline ; les semiconducteurs à ce moment-là sont des conducteurs.

Les matériaux largement utilisés en électronique pour réaliser des composants tels que les diodes, les transistors, les thyristors, les circuits intégrés ainsi que les lasers à semiconducteur sont des corps quadrivalents.

Un corps quadrivalent possède quatre électrons de valence dans sa couche périphérique. Ce sont les électrons de valence qui interviennent dans les propriétés électriques des éléments. [1]

1-2-Bandes d'énergie :

Les propriétés chimiques et électroniques des éléments sont liées aux électrons. Les principes de la mécanique quantique établissent que dans un atome isolé, les électrons ne peuvent occuper que certains niveaux discrets d'énergie. Dans un monocristal, ces niveaux se trouvent élargis et constituent des bandes. Ainsi, pour chaque élément, il existe un diagramme énergétique (figure (1-1)). [2] .

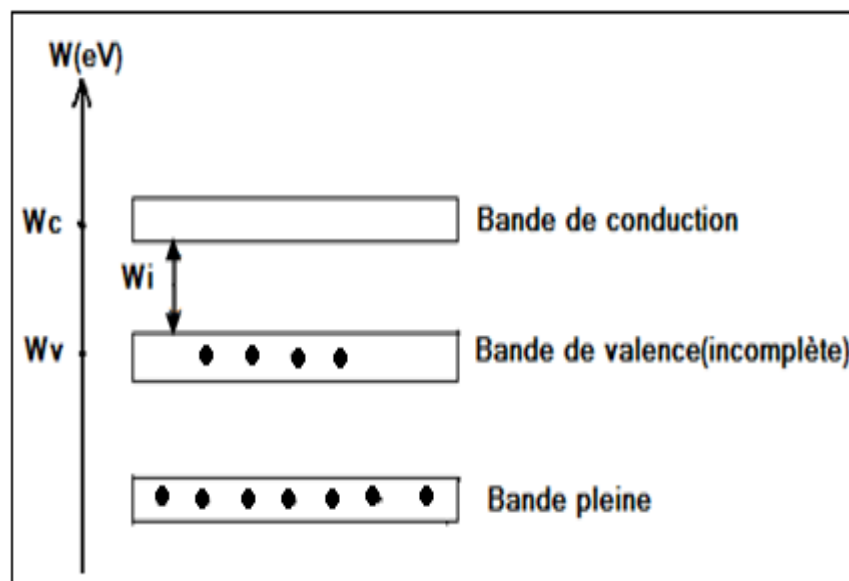


Figure (1-1) Diagramme énergétique.

Les électrons de la couche externe (bande de valence), c'est-à-dire ceux qui participent aux liaisons entre atomes sont peu liés à l'atome et sont susceptibles d'être libérés en passant au niveau supérieur : la bande de conduction. La

transition pourra s'effectuer si une énergie suffisante appelée énergie d'ionisation W_i , peut être cédée à ces électrons. Ces électrons libérés pourront ainsi participer à la conduction des matériaux après application d'un champ électrique. [2]

1-2-1 Les isolants :

Dans les isolants, les bandes d'énergie les plus faibles sont entièrement pleines. La hauteur de la bande interdite est grande (**5eV**). Il n'y a pas de niveaux d'énergie accessibles et pas de conduction. Par exemple, la résistivité du diamant est $=10^{12}$.m et celle du mica varie entre 10^{10} .m et 10^{15} .m. [2]

1-2-2 les conducteurs :

Dans les conducteurs, la dernière bande occupée est partiellement remplie. Il existe beaucoup de niveaux disponibles .La conduction est grande pour des métaux bons conducteurs. [2]

1-2-3 Les semiconducteurs :

Pour les semiconducteurs, le taux de remplissage de la dernière bande occupée est soit très faible soit très important. La hauteur de la bande interdite est faible (**1eV**). La conduction est faible et varie beaucoup avec la température. [2]

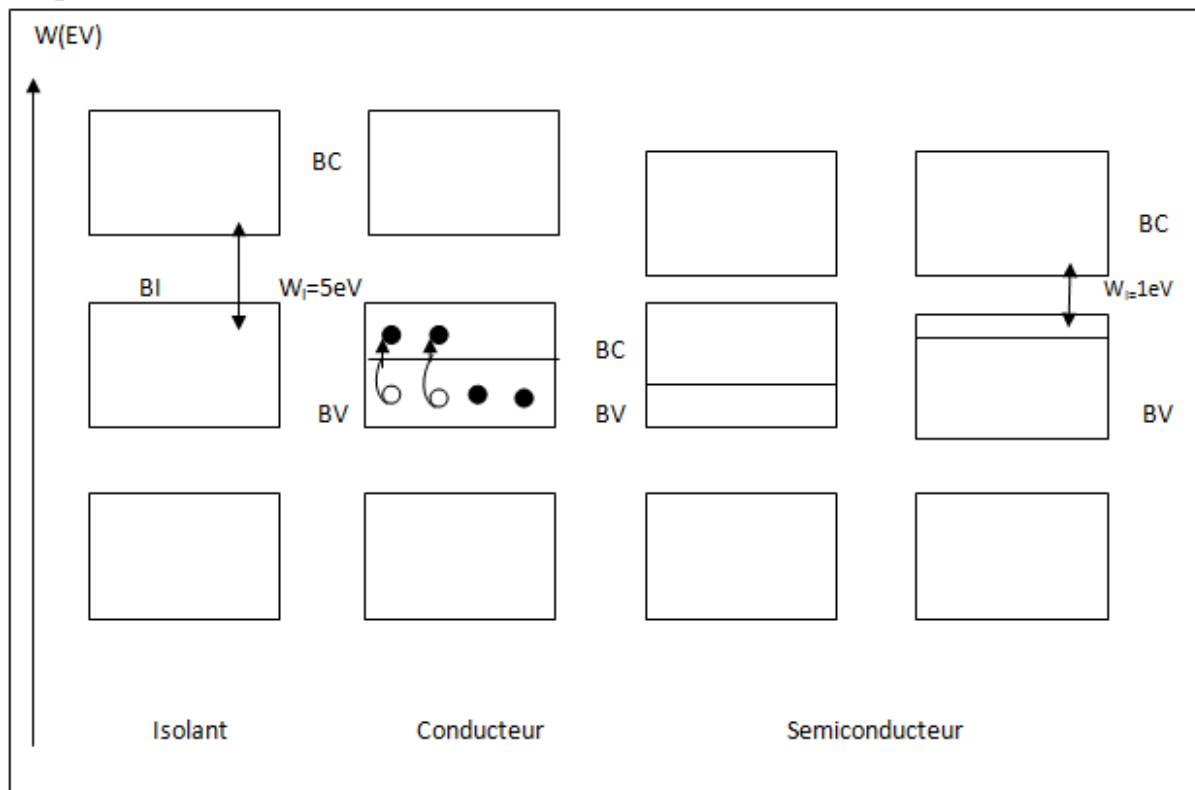


Figure (1-2) Diagrammes énergétiques des isolants, conducteurs et semiconducteurs.

1-3- Semiconducteur intrinsèque : [3]

Un semiconducteur intrinsèque est un semiconducteur dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité de porteurs. Les électrons de la bande de conduction ne peuvent résulter que de l'excitation thermique d'électrons liés de la bande de valence. Il en résulte que les électrons et les trous existent nécessairement par paires et :

$$n = p = n_i \quad (1-1)$$

n_i : est appelé densité de porteurs intrinsèques, c'est une caractéristique du semiconducteur à une température donnée.

1-3-1 Densité de porteurs :

Un semiconducteur intrinsèque n'est jamais dégénéré de sorte que le produit :

$$np = n_i^2 \quad (1-2)$$

Est donné par l'expression :

$$np = N_c N_v \exp(-E_g/kT) \quad (1-3)$$

Il en résulte que la densité de porteurs intrinsèques s'écrit :

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp(-E_g/2kT) \quad (1-4)$$

1-3-2 Niveau de Fermi :

On obtient la position du niveau de Fermi en écrivant que $n = p$ soit :

$$N_c \exp(-(E_c - E_{Fi})/kT) = N_v \exp((E_v - E_{Fi})/kT) \quad (1-5)$$

$$\text{Soit : } E_{Fi} = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{1}{2} kT \ln \frac{m_h}{m_e} \quad (1-6)$$

En explicitant le rapport N_v/N_c en fonctions de masses effectives, on obtient :

$$E_{Fi} = (E_c + E_v)/2 + 3/4(kT \ln(m_h/m_e)) \quad (1-7)$$

Le rapport des masses effectives de densité d'état est de 1 dans les semiconducteurs à gap indirect et de 10 dans les semiconducteurs à gap direct. Il en résulte que le niveau de Fermi d'un semiconducteur intrinsèque est toujours très voisin du milieu du gap à la température ambiante:

$$E_{Fi} \approx (E_c + E_v)/2 \quad (1-8)$$

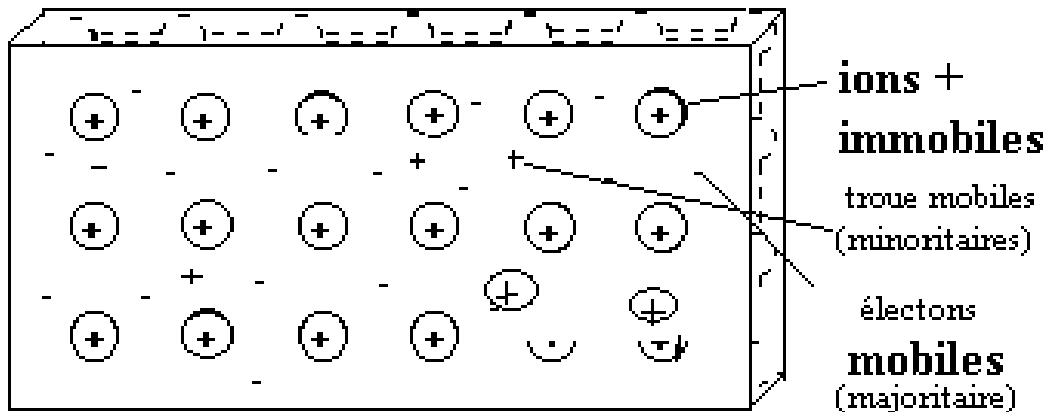
1-4- Semiconducteur extrinsèque :

Les semiconducteurs extrinsèques sont des semiconducteurs dopés qui comportent des atomes étrangers. Ici les matériaux utilisés comme dopant sont de deux types : les matériaux pentavalents (5 électrons de valence) et les matériaux trivalents (3 électrons de valence).

1-4-1 Dopage de type N :

Considérons un semiconducteur dopé avec une densité de donneurs supérieure à la densité d'accepteurs. On dit alors que le semiconducteur est de

type N. Les électrons sont appelés porteurs majoritaires, les trous sont les porteurs minoritaires.



Figure(1-3) Dopage d'un semiconducteur avec des atomes donneurs .

Les atomes pentavalents (donneurs) introduisent des charges positives dans le réseau, ces charges attirent les électrons en créant ainsi de nouveaux niveaux dont l'énergie est légèrement inférieure à ceux de la bande de conduction du matériau pur. Si on élève la température, ces électrons peuvent passer dans la bande de conduction.

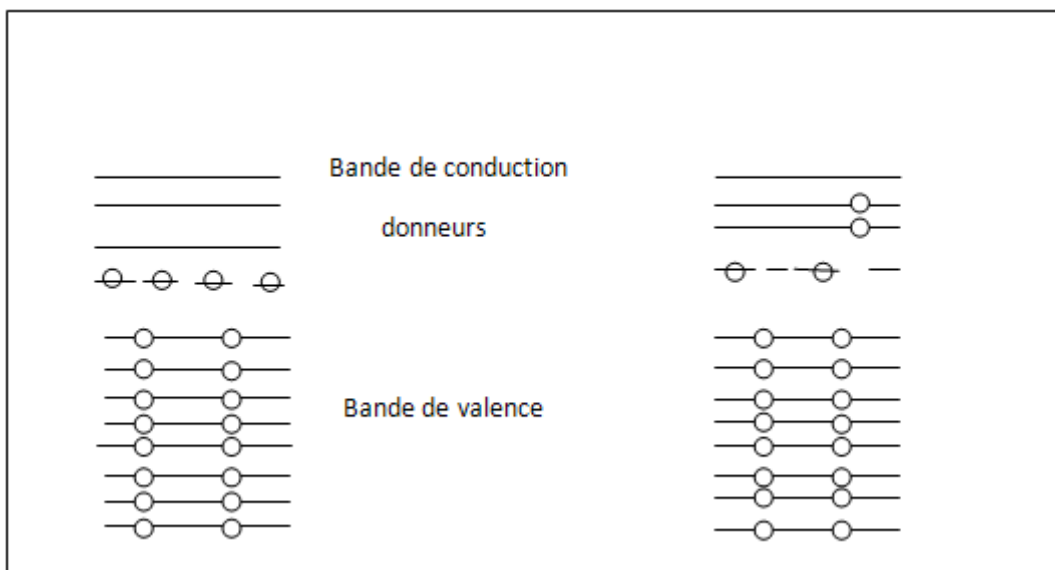


Figure (1-4) Bande d'énergie des semiconducteurs dopés type N.

1-4-2 Dopage de type P :

Dans le dopage de type P, les atomes utilisés sont dits trivalents c'est-à-dire qu'ils ont trois électrons sur leur dernière couche. Dans le dopage P, le but est de créer un grand nombre de trous.

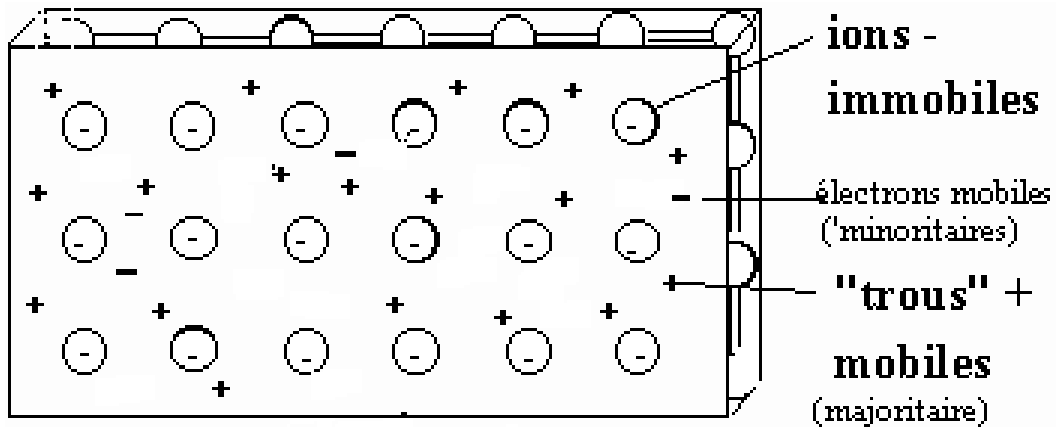


Figure (1-5) Dopage d'un semiconducteur avec des atomes accepteurs.
 Les atomes trivalents (accepteurs) introduisent des trous dans la bande de valence. Si on élève la température ces trous se comportent comme des charges positives libres.

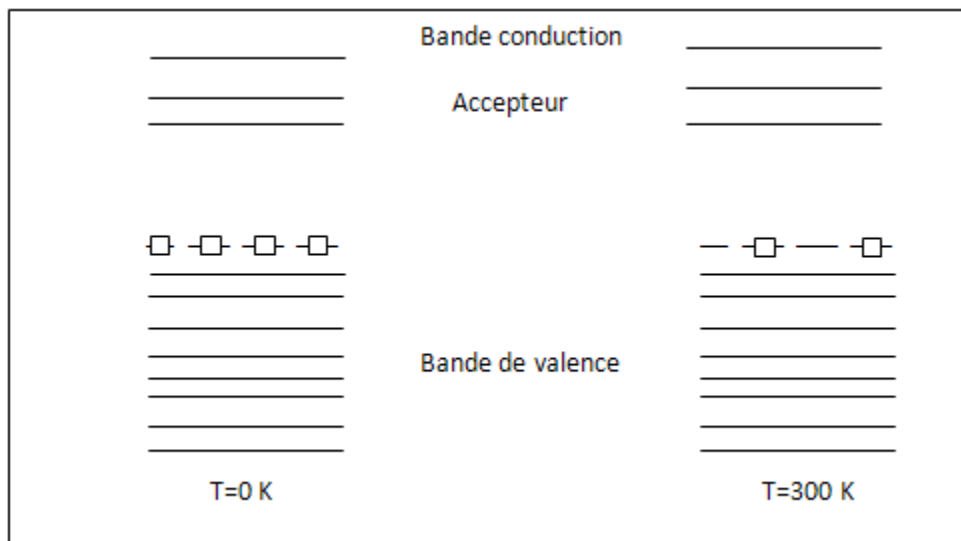


Figure (1-6) Bande d'énergie des semiconducteurs dopés type P.

1-4-3 Calcul de la concentration des porteurs de charge :

Le matériau étant neutre, l'ensemble des charges positives est égal à l'ensemble des charges négatives. L'équation de neutralité électrique du matériau s'écrit :

$$n + N_a^- = p + N_d^+ \quad (1-9)$$

1-4-3-1 semiconducteur de type N :

Dans se cas $N_a = 0$ et $N_d \neq 0$ alors l'équation devient :

$$n - p = N_d^+ \quad (1-10)$$

Equation à laquelle, nous associons la loi d'action de masse :

$$np = n_i^2 \quad (1-11)$$

Dans le domaine de fonctionnement normal des dispositifs, c'est-à-dire pour les températures intermédiaires ($100\text{K} < T < 400\text{K}$) tous les donneurs sont ionisés : $N_d^+ = N_d$ alors.

$$\begin{cases} n - p = N_d \\ n \cdot p = n_i^2 \end{cases} \quad (1-12)$$

La résolution de (1-12) donne :

$$\begin{cases} n_N = \frac{N_d + \sqrt{N_d^2 + 4n_i^2}}{2} \\ p_N = \frac{n_i^2}{n_N} \end{cases} \quad (1-13)$$

Si, de plus $N_d^2 \gg n_i^2$, alors :

$$n_N = N_d \quad (1-14)$$

Et :

$$p_N = \frac{n_i^2}{N_d} \quad (1-15)$$

1-4-3-2 Semiconducteur de type P :

Ici, $N_a \neq 0$ et $N_d = 0$

Avec un raisonnement analogue, nous obtiendrons pour les températures intermédiaires :

$$\begin{cases} n_P = \frac{N_a + \sqrt{N_a^2 + 4n_i^2}}{2} \\ p_P = \frac{n_i^2}{n_P} \end{cases} \quad (1-16)$$

Si de plus $N_a^2 \gg n_i^2$ alors :

$$p_P = N_a \quad (1-17)$$

$$n_P = \frac{n_i^2}{N_a} \quad (1-18)$$

1-4-4 Le courant total des porteurs :

Un semiconducteur contient deux types de charges mobiles : les électrons et les trous. Ces charges peuvent se déplacer sous l'effet :

- ✓ D'un champ électrique \vec{E} : on a un courant de conduction.
- ✓ D'un gradient de concentration : et on a un courant de diffusion.

1-4-4-1 Le courant de conduction :

La densité de courant électrique des électrons est donnée par :

$$\vec{J}_n = nq\mu_n \vec{E} = \sigma_n \vec{E} = nq\vec{V}_n \quad (1-19)$$

$$\vec{J}_p = pq\mu_p \vec{E} = \sigma_p \vec{E} = pq\vec{V}_p \quad (1-20)$$

Le courant total de conduction se déduit de la contribution des électrons et des trous, soit :

$$\vec{J}_c = \vec{J}_n + \vec{J}_p = \sigma \vec{E} \quad (1-21)$$

$$\text{Où : } \sigma = \sigma_n + \sigma_p$$

$$\text{Et : } \sigma_n = nq\mu_n \quad (1-22)$$

$$\sigma_p = pq\mu_p \quad (1-$$

23)

1-4-4-2 Le courant de diffusion :

Les densités de courant électrique de diffusion d'électrons et de trous sont données par la charge volumique diffusant par seconde à travers l'unité d'aire :

$$\vec{J}_n = q D_n \vec{\nabla}_n \quad (1-24)$$

$$\vec{J}_p = q D_p \vec{\nabla}_p \quad (1-25)$$

La densité de courant électrique total dans un semiconducteur est :

$$\vec{J} = \vec{J}_{dn} + \vec{J}_{dp} = q D_n \vec{\nabla}_n + q D_p \vec{\nabla}_p \quad (1-26)$$

Où :

$$\vec{J}_n = nq\mu_n \vec{E} + q D_n \vec{\nabla}_n \quad (1-27)$$

$$\vec{J}_p = pq\mu_p \vec{E} - q D_p \vec{\nabla}_p \quad (1-28)$$

1-4-4-3 La longueur de diffusion :

La relation d'Einstein s'écrit :

$$\frac{\mu_n}{D_n} = \frac{\mu_p}{D_p} = \frac{q}{kT} \quad (1-29)$$

La densité de porteurs en excès décroît exponentiellement avec une constante de temps L_n . L_n est appelé longueur de diffusion des électrons dans le matériau de type P. On définit la même grandeur pour les trous dans un matériau de type N.

$$L_n = \sqrt{D_n \theta_n} \text{ et } L_p = \sqrt{D_p \theta_p} \quad (1-30)$$

1-5 La jonction P N :

Une jonction P N est constituée par la juxtaposition de deux régions de type différent d'un même monocristal de semiconducteur. La différence des densités de donneurs et d'accepteurs, $N_d - N_a$, passe d'une valeur négative dans la région de type P à une valeur positive dans la région de type N. La loi de variation de cette grandeur dépend essentiellement de la technique de fabrication. Différents modèles peuvent être utilisés pour étudier théoriquement les propriétés de la jonction ; jonction abrupte, linéaire . . .

Le modèle de la jonction abrupte donne des résultats en très bon accord avec le comportement de la jonction. C'est le modèle que nous allons développer. [3]

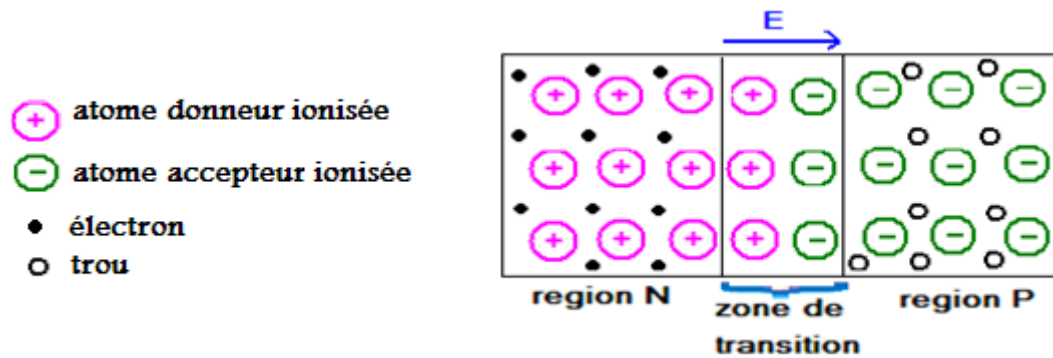


Figure (1-7) La jonction PN après formation.

1-5-1 La jonction abrupte : [3]

Dans le modèle de la jonction abrupte, la différence $N_d - N_a$ passe brutalement dans le plan $x = 0$ d'une valeur négative dans la région de type P à une valeur positive dans la région de type N. (Figure 1-8)

Les trous, majoritaires dans la région de type P, diffusent vers la région de type N où ils se recombinaient avec les électrons, il en est de même pour les électrons, dans l'autre sens, la recombinaison des porteurs libres de part et d'autre de la jonction fait apparaître une zone de charge d'espace : la ZCE résultant de la présence des donneurs et accepteurs ionisés, dont les charges ne sont plus intégralement compensées par celles des porteurs libres. Un champ électrique interne qui s'oppose à la diffusion des porteurs majoritaires apparaît.

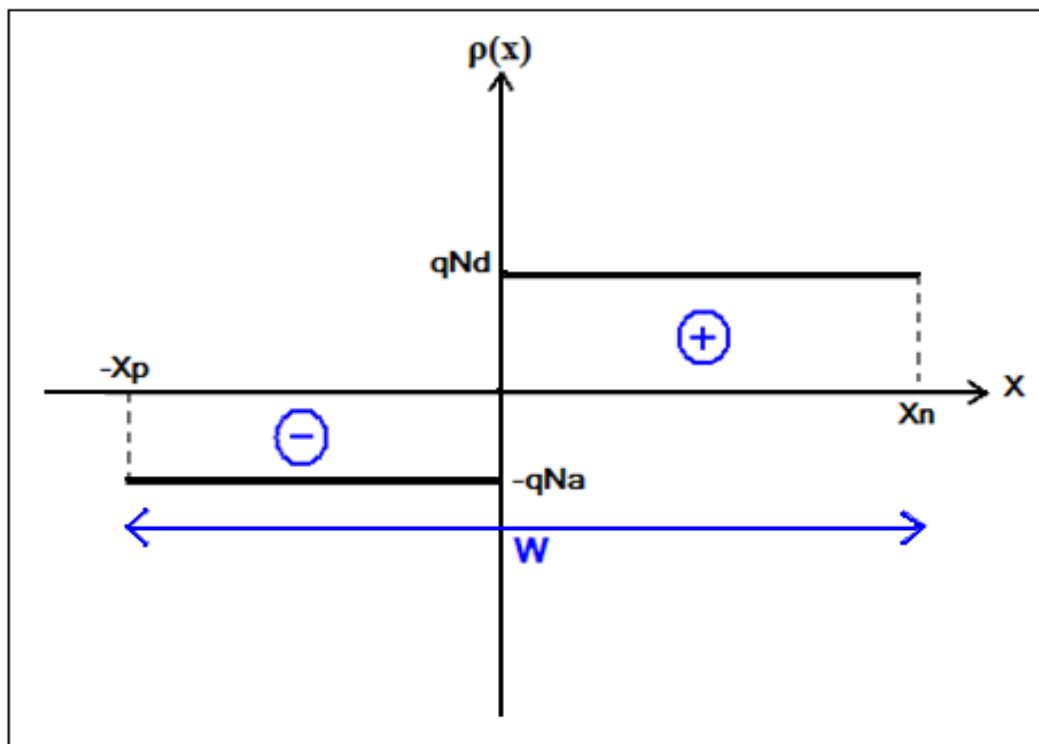


Figure (1-8) Profil abrupte d'une jonction PN

Les densités de porteurs libres dans les régions sont alors données par :

$$n_N = N_d \quad p_N = \frac{n_i^2}{N_d} \quad (1-31)$$

$$n_P = \frac{n_i^2}{N_a} \quad p_P = N_a \quad (1-32)$$

En supposant tous les donneurs et accepteurs ionisés, la charge d'espace dans chacune des régions de la jonction est :

$$\rho(x) = q[N_d - N_a + p(x) - n(x)] \quad (1-33)$$

La densité de charge s'écrit dans cette hypothèse :

$$\rho(x) = 0 \quad \text{pour} \quad x < x_p \quad \text{et} \quad x > x_n$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho(x) = -qN_a \quad \text{pour} \quad x_p < x < 0 \\ \rho(x) = qN_d \quad \text{pour} \quad 0 < x < x_n \end{array} \right. \quad (1-33)$$

1-5-1-1 Potentiel et champ électrique dans la zone de charge d'espace :

Il suffit, pour obtenir le potentiel et le champ électrique, d'intégrer l'équation de Poisson avec la densité de charge donnée par les équations. (1-33)

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon} \quad (1-34)$$

Pour $x_p < x < 0$ l'équation de Poisson s'écrit :

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{qN_a}{\epsilon} \quad (1-35)$$

En intégrant deux fois avec les conditions $E = 0$ et $V = V_p$ en $x = x_p$ on obtient :

$$\frac{dV}{dx} = \frac{qN_a}{\epsilon} (x - x_p) \quad (1-36)$$

$$V = \frac{qN_a}{2\epsilon} (x - x_p)^2 + V_p \quad (1-37)$$

Pour $0 < x < x_n$ l'équation de Poisson s'écrit :

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{qN_D}{\epsilon} \quad (1-38)$$

En intégrant deux fois avec les conditions $E=0$ et $V=V_n$ en $x=x_n$ on obtient :

$$\frac{dV}{dx} = q \frac{N_d}{\epsilon} (x - x_n) \quad (1-39)$$

$$V = q \frac{N_d}{2\epsilon} (x - x_n)^2 + V_n \quad (1-40)$$

Le champ électrique est dirigé suivant x et donné par $E = -\frac{dV}{dx}$, soit :

$$\text{Pour } x_p < x < 0 \quad E = q \frac{N_a}{\epsilon} (x - x_p) \quad (1-41)$$

$$\text{Pour } 0 < x < x_n \quad E = q \frac{N_a}{\epsilon} (x - x_p) \quad (1-42)$$

1-5-1-2 Largeur de la zone de d'espace : [3]

La continuité en $x=0$ de la composante normale du vecteur déplacement

$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$, permet d'établir une relation entre x_n et x_p . Ecrivons $\varepsilon E_{0-} = \varepsilon E_{0+}$, soit :

$$qN_a x_p = qN_d x_n$$

En posant $\chi_p = |x_p| = -x_p$ et $\chi_n = |x_n| = x_n$, la relation s'écrit :

$$N_a \chi_p = N_d \chi_n \quad (1-43)$$

On obtient l'expression de la charge de la zone de charge d'espace en écrivant la continuité du potentiel en $x=0$

$$\frac{qN_a}{2\varepsilon} \chi_p^2 + V_p = \frac{qN_d}{2\varepsilon} \chi_n^2 + V_n \quad (1-44)$$

Soit :

$$V_d = V_n - V_p = \frac{q}{2\varepsilon} (N_d \chi_n^2 + N_a \chi_p^2) \quad (1-45)$$

En utilisant la relation (1-43), cette expression s'écrit sous l'une ou l'autre des formes suivantes :

$$V_d = \frac{qN_d}{2\varepsilon} \chi_n^2 \left(1 + \frac{N_d}{N_a} \right) = \frac{qN_a}{2\varepsilon} \chi_p^2 \left(1 + \frac{N_a}{N_d} \right) \quad (1-46)$$

Ce qui donne pour X_n et X_p les expressions:

$$\chi_n^2 = \frac{2\varepsilon}{2N_d} \frac{1}{1 + N_d/N_a} V_d \quad (1-47)$$

$$\chi_p^2 = \frac{2\varepsilon}{2N_a} \frac{1}{1 + N_a/N_d} V_d \quad (1-48)$$

En explicitant la tension de diffusion à partir de l'expression $V_d = \frac{kT}{q} \text{Ln} \frac{N_d N_a}{n_i^2}$ on obtient :

$$\chi_n = 2L_{Dn} \sqrt{\frac{1}{1 + N_d/N_a} + \text{Ln} \frac{N_a N_d}{n_i^2}} \quad (1-49)$$

$$\chi_p = 2L_{Dp} \sqrt{\frac{1}{1 + N_a/N_d} + \text{Ln} \frac{N_d N_a}{n_i^2}} \quad (1-50)$$

Avec :

$$L_{Dn} = \sqrt{\frac{\epsilon kT}{2q^2 N_d}} \quad L_{Dp} = \sqrt{\frac{\epsilon kT}{2q^2 N_a}} \quad (1-51)$$

L_{Dn} et L_{Dp} sont les longueurs de Debye dans les régions de type P et de type N.

La largeur de la zone de charge d'espace $\chi = \chi_n + \chi_p$. La zone de charge d'espace se développe essentiellement dans la région la moins dopée, sa largeur est donnée par :

$$\chi \approx \chi_n \approx 2L_{Dn} \sqrt{\ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}} \quad (1-52)$$

1-5-1-3 Le courant de la jonction P N : [4]

Le courant d'une jonction P-N est la somme des valeurs absolues des courants donnés par les relations suivantes :

$$I = |I_p(x_n)| + |I_n(-x_p)| \quad (1-53)$$

Et on a :

$$I_p(x_n) = \frac{qSD_p}{L_p} P_N [\exp \frac{qV}{kT} - 1] \quad (1-54)$$

Et :

$$I_n(-x_p) = \frac{qSD_n}{L_n} n_p [\exp \frac{qV}{kT} - 1] \quad (1-55)$$

Soit encore :

$$I = qS \left(\frac{D_p}{L_p} P_N + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) [\exp \frac{qV}{kT} - 1] \quad (1-56)$$

Si on pose :

$$I_0 = qS \left(\frac{D_p}{L_p} P_N + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) \quad (1-57)$$

La relation (1-56) s'écrit :

$$I = I_0 [\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1] \quad (1-58)$$

1-6-CONCLUSION :

Dans le présent chapitre, nous avons donné en premier lieu les notions fondamentales des semiconducteurs, en particulier extrinsèques avec les

différentes grandeurs. Puis, nous avons décrit la formation de la jonction PN en particulier la jonction abrupte.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans ce travail on a étudié une cellule solaire photovoltaïque formée par l'hétérojonction nCdS/pCdTe.

Les propriétés des matériaux CdS et CdTe jouent un rôle primordial dans les performances de la cellule. On a étudié les paramètres et les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.

Nos calculs ont abouti à un rendement de conversion égal à 15,5% comparé au rendement de cellule au silicium amorphe qui est de 5 à 10%, il est meilleur.

De nos jours les cellules solaires en films minces sont de plus en plus utilisées en particulier CdTe est un matériau qui possède plusieurs avantages: le coefficient d'absorption qui est élevé, le gap E_g 1,5 eV est idéal pour la conversion photovoltaïque du spectre solaire.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

Ma première pensée en cette période déterminante de ma vie à ma mère (rahimaha Allah).

Mon père qui m'a beaucoup encouragée et donnée, je ne peux le remercier assez de m'avoir donné le meilleur.

Mes chers frères Ibrahim, Mohammed, Soufiane, Yahia et Ismaïl, et beau-frère Miloud.

Mes chères sœurs Souâd et Fatima.

Ma petite nièce Nour Yamena.

Toute ma famille.

Mon fiancé Kamel.

Mon binôme « Halima » que je remercie du fond de cœur pour sa patience avec moi durant ce mémoire, et tous les moments partagés ensemble.

Mes chers amies : Fatima Zohra et Khadidja.

Toute mes amies en particulier : Halima, Radia, Asma, Meriem, Samira, Sara, Houaria, Hanane, et Rahima.

Ma promotion de 3^{ème} année LMD physique

A mes collègues et tous ceux qui me connaisse.

NABAWIYA

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

L'âme de mon père qui m'a bien éduquée.

Ma vénérable mère qui m'a donnée beaucoup d'aide et de courage pour réussir dans mon cursus scolaire.

Mon cher frère Ahmed et beau-frère Lahcen.

Mes chères sœurs Hayet, Fatima, fatma et ma belle-sœur Fatima, que Dieu le tout puissant prolonge leurs vies.

Mes chers neveux Hicham, Billal, Houssam, Soufiane, Souhaib et Mohammed.

Mes chères nièces Abir et Amel.

Mon fiancé Nadji.

Mon binôme « Nabawiya » et sa famille.

Toute mes amies : Rahima, Hanane, Noura, Djamila, Souhier, Nassima, Amina et surtout Fatima Zohra.

Ma promotion de 3^{ème} année LMD physique.

A mes collègues et tous ceux qui me connaisse.

HALIMA

Remerciements

Louange à notre seigneur « ALLAH » qui nous a dotées de la merveilleuse Faculté des sciences.

Louange à notre créateur qui nous a incitées à acquérir le savoir, c'est à lui que j'adresse toute ma gratitude en premier lieu.

En second lieu, nous tenons à remercier :

« M^{me} GHAFFOR », pour nous avoir aidées, orientées et conseillées durant notre travail, nous espérons avoir été à la hauteur de ses intentions, et nos professeurs qui ont accepté d'examiner ce travail et de participer au jury de notre mémoire.

Nous n'oublierons pas de remercier vivement les enseignants qui ont assuré notre formation.

En fin, nous remercions tous ceux qui, ont collaboré, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Introduction générale

Introduction générale :

Durant les dernières années ; les cellules solaires photovoltaïques à base des matériaux II –VI ont été largement utilisées, plus particulièrement pour les applications spatiales et ce pour leur rendement élevé et leur faible dégradation face aux irradiations dans l'espace.

Dans les cellules solaires à hétérojonction, le champ électrique créé par la gradient de la zone de charge d'espace permet de réduire le processus de la recombinaison superficielle. Ceci augmente la conductibilité et les performances des cellules solaires.

Le tellurure de cadmium possède des propriétés cristallographiques et électriques très intéressantes le rendant ainsi très recherché pour la fabrication de cellules solaires.

Dans cet ordre d'idées nous nous sommes proposées de traiter des cellules photovoltaïques à base d'hétérojonction n CdS/p CdTe.

Nous introduisons pour cette étude, les notions de semiconducteurs, de jonction PN et en particulier l'hétérojonction PN où nous donnons les principales grandeurs.

Ensuite nous passons à l'étude de la cellule solaire photovoltaïque pour passer à celle au CdS/CdTe qui fait l'objet de notre travail.

La liste des symboles

LA LISTE DES SYMBOLES :

- BC** : Bande de conduction.
- BI** : Bande interdite.
- BV** : Bande de valence.
- D_n** : La constante de diffusion des électrons.
- D_p** : La constante de diffusion des trous.
- E** : Le champ électrique.
- E_g** : Energie de gap.
- E_c** : Energie de la bande de conduction.
- E_v** : Energie de la bande de valence.
- FF** : Facteur de forme.
- I** : Courant.
- I₀** : Courant de saturation.
- I_m** : Valeur maximale de courant.
- I_{cc}** : Courant de court- circuit.
- I_D** : Courant d'obscurité de la diode.
- I_{ph}** : Photocourant.
- k** : Constant de Boltzmann.
- k_n** : permittivité de coté N.
- k_p** : permittivité de coté P.
- K** : Température en degré kelvin.
- L_{Dn}** : Longueur de diffusion des électrons.
- L_{Dp}** : Longueur de diffusion des trous.
- n** : Concentration des électrons.
- n_i** : Concentration intrinsèque à l'équilibre thermique.
- N_a** : Concentration des atomes accepteurs.
- N_a⁻** : Concentration des atomes accepteurs ionisés.
- N_d** : Concentration des atomes donneurs.
- N_d⁺** : Concentration des atomes donneurs ionisés.
- N_c** : Densité effective d'état dans la bande de conduction.
- N_v** : Densité effective d'état dans la bande de valence.
- p** : Concentration des trous.
- P₀** : Puissance incidente.
- P_m** : Puissance maximale.
- q** : Charge de l'électron.
- R_s** : Résistance série.
- R_{sh}** : Résistance parallèle.
- S** : Surface de la cellule.
- T** : Température.
- V** : Tension appliquée.
- V_d** : Tension de diffusion.
- V_{co}** : Tension de circuit ouvert.

V_m : Valeur maximale de la tension.

V_{th} : Tension thermique.

W : Largeur de la ZCE.

W_i : Energie d'ionisation.

x_N : Largeur de la région 'N'.

x_P : Largeur de la région 'P'.

ZCE : Zone de Charge d'Espace.

 : Rendement.

 : Densité volumique de charges.

ϕ : Flux incident.

Sommaire

SOMMAIRE :

Sommaire.....	2
Liste des symboles	6
Introduction générale	10
Chapitre 1 : Notions sur les semiconducteurs-La jonction PN	
1-1 Introduction-Définition	12
1-2 Bandes d'énergie	12
1-2-1 Les isolants	13
1-2-2 Les conducteurs	13
1-2-3 Les semiconducteurs	13
1-3 Semiconducteur intrinsèque.....	14
1-4 Semiconducteur extrinsèque	15
1-4-1 Dopage de type N	16
1-4-2 Dopage de type P	17
1-4-3 Calcul de la concentration des porteurs de charges	18
1-4-4 Le courant total des porteurs	19
1-5 La jonction PN	20
1-5-1 La jonction abrupte	21
1-6 Conclusion	25
Chapitre 2 : La cellule solaire photovoltaïque	
2-1 Définition de la cellule photovoltaïque	27
2-2 Les types de cellules	27
2-3 Fonctionnement d'une cellule solaire	28
2-4 Principe de fonctionnement	29
2-4-1 Caractéristiques	30
2-5 Paramètres des cellules solaires	31
2-5-1 Le courant de court – circuit I_{cc}	31
2-5-2 La tension en circuit ouvert V_{co}	31
2-5-3 Facteur de forme FF	32
2-5-4 Le rendement de conversion d'énergie	32
2-6 Modélisation d'une cellule solaire	33
2-6-1 Cas idéal	33
2-6-2 Cas réel	33
2-7 Conclusion	36
Chapitre 3: Etude et analyse d'une cellule solaire à hétérojonction CdS/CdTe	
3-1 Introduction	38

3-2	Détermination du champ électrique E, du potentiel de la diffusion Vd et de la largeur de la ZCE	40
3-3	La filière CdS/CdTe	43
3-3-1	Introduction	43
3-3-2	Historique.....	44
3-3-3	toxicité	44
3-4	Le tellure de cadmium CdTe et le sulfure de cadmium	45
3-5	Cellule solaire à hétérojonction CdS/CdTe	46
3-5-1	Introduction.....	46
3-5-2	hétérojonction CdS/CdTe	47
3-5-3	Cellule solaire CdS/CdTe	48
3-6	Etude d'une cellule solaire à hétérojonction n CdS/p CdTe.....	49
3-6-1	Calcul du courant de saturation I_0	49
3-6-2	Calcul du courant maximal I_m	49
3-6-3	Calcul du courant de photon I_{ph}	50
3-6-4	Calcul du la tension de circuit ouvert V_{co}	50
3-6-5	Calcul du la puissance maximale	51
3-6-6	Le facteur de forme	51
3-6-7	Le rendement de conversion.....	51
3-6-8	Trace de la caractéristique $I = f(V)$ sous éclairement.....	52
3-7	Conclusion.....	52
Conclusion	général	
.....		54
Bibliographie		56