
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électronique
Spécialité Micro-Optoélectronique

présenté par

HADJ AMEUR Rachid

&

DAOUDI Asmaâ

ETUDE ET SIMULATION D'UNE JONCTION P-N CIRCULAIRE

Proposé par : M^r. NACER Said

Année Universitaire 2016-2017

Remerciements

En préambule à ce mémoire nous remerciant ALLAH qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

Ce mémoire n'aurait pas été possible sans l'intervention, consciente, d'un grand nombre de personnes.

Nous souhaitons ici les en remercier.

Nous tenons d'abord à remercier très chaleureusement M^r, NACER Said qui nous a permis de bénéficier de son encadrement. Les conseils qu'il nous a prodigué, la patience, la confiance qu'il nous a témoignés ont été déterminants dans la réalisation de notre travail de recherche.

Nos remerciements s'étendent également à tous nos enseignants durant les années des études : Mr. AISSAT, M^r. HEBIB, M^r. MAHDOUM, M^r. OUSSALAH, et tous les professeurs du département d'électronique.

A nos familles et nos amis qui par leurs prières et leurs encouragements, on a pu surmonter tous les obstacles

A purple pen is shown writing the word "Merci" in a cursive script. The pen is positioned at the end of the word, with the tip of the nib pointing towards the right. The background is white.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

ملخص:

لقد قدمنا نموذج تحليلي للتقاطع الشعاعي P-N في تركيب قلب-غمد للأسلاك المجهريّة، تم حساب توزيع المجال والجهد الكهربائيين على امتداد التقاطع الشعاعي وكذلك اشتقاق المعادلات التحليلية للحصول على عرض منطقة شحنة الفضاء وقيمة المجال الكهربائي الأقصى للتقاطع، سنبين ان تغير عرض منطقة شحنة الفضاء سيكون بتغير نصف قطر القلب و تركيز الشوارد المانحة والمستقبلة وكذلك شدة التيار المطبقة على التقاطع، أخيرا سنقوم بإظهار الخاصية تيار-جهد للتقاطع الشعاعي

كلمات المفاتيح: التقاطع الدائري P-N ، قلب-غمد، خيط نانو.

Résumé :

Nous avons présenté un modèle analytique pour la jonction P-N radiale dans une structure cœur-gaine de nano fils (NW). Les répartitions du potentiel et du champ électriques à travers la jonction P-N radiale sont calculées et les expressions analytiques sont dérivées pour déterminer la largeur de la zone de charge d'espace et le champ électrique maximum. Nous montrons que l'élargissement de la zone de charge d'espace varie en fonction du rayon du noyau, de la concentration des impuretés des donneurs et des accepteurs et de la tension de polarisation. La caractéristique courant-tension est également déterminée.

Mots clés : Jonction P-N radiale, Cœur-gaine, Nano-fil.

Abstract :

We presented an analytical model for the radial P-N junction in a nanowire (NW) core-shell structure. The electrical potential and field distributions across the radial P-N junction are computed and the analytical expressions are derived to determine the width of the depletion region and the maximum electric field. We show that the widening of depletion region depends on the core radius, the concentration of donor and acceptor impurities and the polarization voltage. The current-voltage characteristic is also determined.

Keywords: Radial P-N Junction, Core-Shell, Nano-Wire.

LISTES DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS

ρ : Densité de charge

ϵ : Permittivité du matériau NW

k : Constant de Boltzmann

E : Champ électrique

V : Potentiel électrique

X_p : Largeur de la Z.C.E dans la région P

X_n : Largeur de la Z.C.E dans la région N

T : La température

N_a : La concentration de dopants accepteurs ionisés dans le matériau P

N_d : La concentration de dopants donneurs ionisés dans le matériau N

N_c : Nombre d'états utiles dans la bande de conduction

n_i : La concentration intrinsèques des porteurs libres

q : Charge élémentaire

r_c : Rayon du cœur

r_g : Rayon du nanofil (NW)

r_n et r_p : rayons définissant les zones de charges d'espace

V_d : Tension de diffusion

V_a : Tension appliquée

V_p : Potentiel dans le matériau P

V_n : Potentiel dans le matériau N

E_c : Energie de la bande de conduction

E_F : Niveau de Fermi

Z.C.E : Zone de Charge d'Espace

NW : NanoWires

TABLE DES MATIERES

Introduction générale

PARTIE THEORIQUE

Chapitre 1 : Théorie de la jonction P-N « radiale »	3
1.1 Introduction	3
1.2. Introduction aux milieux matériels.....	3
1.3 La jonction P-N plane.....	4
1.3.1 Types de Jonction P-N Plane.....	6
1.3.2 La jonction P-N à l'équilibre «non polarisée »	7
1.3.3 La jonction P-N polarisée	8
1.3.4 Théorie de la Jonction P-N Plane.....	9
a. Densités de charge $\rho(x)$	10
b. Calcul du champ électrique	11
c. Calcul du potentiel électrique.....	12
d. Calcul de la tension de diffusion V_d « barrière de potentiel ».....	14
e. Calcul de la largeur de la zone de charge d'espace W (Zone de déplétion).....	14
1.4 La jonction P-N radiale	15
1.4.1 Les cellules solaires à base de la jonction P-N radiale « Les nanofils »	15
1.4.2 Théorie de la jonction P-N radiale.....	16
a. Densités de charge $\rho(r)$	17
b. Calcul du champ électrique	18
c. Calcul du potentiel électrique	20
1.5 Conclusion	21

Chapitre 2 : Simulations et Résultats.....	22
2.1 Introduction.....	22
2.2 Logiciels utilisés.....	23
2.2.1 Principe de MATHCAD.....	23
2.2.2 Principe de COMSOL.....	23
2.3 Simulations et Résultats.....	23
2.3.1 Evolution de la densité de charge, du champ électrique et du potentiel..	23
2.3.2 L'élargissement de la Z.C.E « W ».....	25
a. Variation de la Z.C.E « W », W_p , W_n en fonction de r_c	25
b. Variation de la Z.C.E en fonction de N_a	26
c. Variation de la Z.C.E en fonction de N_d	27
d. Variation de la Z.C.E en fonction de V_a	28
2.3.3 Variation du champ électrique maximum « E_{max} ».....	29
a. Variation de E_{max} en fonction de r_c	29
b. Variation E_{max} en fonction de N_a	30
c. Variation E_{max} en fonction de N_d	31
d. Variation E_{max} en fonction de V_a	32
2.3.4 La caractéristique courant-tension de la jonction P-N radiale.....	32
2.4 Conclusion	33
Conclusion générale.....	35
BIBLIOGRAPHIE	36

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 Théorie de la jonction P-N « radiale ».....	3
Figure 1.1. Structure en bandes d'énergie des matériaux, Isolants, Semi-conducteur Métaux.....	4
Figure 1.2. Représentation d'une jonction P-N à l'équilibre thermodynamique.....	5
Figure 1.3. Evolution de la différence ($N_d - N_a$). a) abrupte et b) graduelle.....	6
Figure 1.4. Représentation d'une jonction P-N à l'équilibre thermodynamique.....	7
Figure 1.5. Représentation d'une jonction P-N en polarisation direct.....	8
Figure 1.6. Représentation d'une jonction P-N en polarisation inverse.....	9
Figure 1.7. Evolution de la densité de charge $\rho(x)$ dans une Jonction P-N plane.....	10
Figure 1.8. Champ électrique dans les différentes régions de la jonction P-N plane.....	12
Figure 1.9. Potentiel électrique dans les différentes régions de la jonction P-N plane.	14
Figure 1.10. Représentation géométrique de la jonction P-N Radiale.....	17
Figure 1.11. Evolution de la densité de charge $\rho(r)$ dans une Jonction P-N Radiale.....	18
Figure 1.12. Champ électrique dans les différentes régions de la jonction P-N radiale	19
Figure 1.13. Potentiel électrique dans les différentes régions de la jonction P-N Radiale.....	20
Chapitre 2 : Résultats Et Simulations.....	22
Figure 2.1. Evolution de la densité de charge $\rho(r)$, Champ électrique $E(r)$ et Le Potentiel électrique $V(r)$ dans les différentes régions de la jonction P-N Radiale.....	24
Figure 2.2. Représentation géométrique de la jonction P-N Radiale.....	25
Figure 2.3. Evolution de la Z.C.E en fonction de r_c	26
Figure 2.4. Evolution de la Z.C.E en fonction de N_a	27
Figure 2.5. Evolution de la Z.C.E en fonction de N_d	28
Figure 2.6. Evolution de la Z.C.E en fonction de V_a	29
Figure 2.7 Evolution de E_{max} en fonction de r_c	30
Figure 2.8 Evolution de E_{max} en fonction de N_a	31
Figure 2.9 Evolution de E_{max} en fonction de N_d	31
Figure 2.10 Evolution de E_{max} en fonction de V_a	32
Figure 2.11. Evolution de la caractéristique courant-tension de la Jonction P-N Radial	33

Introduction générale

On s'attend à ce que Les semi-conducteurs nanofils dits Nanowires « NW » à base d'une jonction P-N radiale jouent un rôle important dans les innovations technologiques de ce siècle. En particulier, Ils ont attiré une attention considérable car ils peuvent potentiellement être utilisés dans le domaine de la conversion d'énergie, comme dans les cellules solaires.

Dans le but de réaliser la simulation de la jonction P-N radiale, de nombreuses tentatives empiriques ont été faites pour optimiser l'efficacité des dispositifs. Cependant, peu de travail a été fait pour établir des modèles fondamentaux d'électrostatique sous-jacente des NW. Des rapports ultérieurs ont examiné les NW minces, mais ont utilisé des modèles numériques, limitant ainsi l'extraction du comportement physique qualitatif pour une grande variété de paramètres NW [1]. Il est donc nécessaire de disposer d'un modèle radiale de la jonction P-N qui s'applique à une grande variété de densités.

Dans cette contribution, l'équation de Poisson est résolue pour une structure P-cœur / N-gaine pour donner des profils de bande d'énergie radiale, du champ électrique et du potentiel. Les équations de ce modèle numérique sont dérivées pour calculer la largeur de la région de zone de charge d'espace et le champ électrique maximum. Le modèle numérique est utilisé sous environnement MATHCAD pour générer des résultats pour une large gamme de paramètres affectant la physique sous-jacente de la jonction P-N radiale.

Le résultat obtenu va être vérifié et confirmé à travers un deuxième simulateur COMSOL. La caractéristique courant-tension est également déterminée.

Ce mémoire est organisé de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter le milieu matériel, la jonction P-N plane et leurs différents types. Ensuite, nous allons présenter l'analyse théorique de la jonction P-N plane et radiale. On va décrire la solution de l'équation de Poisson et des équations de transport par des méthodes numériques pour trouver le champ électrique, le potentiel, la largeur de la zone de charge d'espace Z.C.E et le champ électrique maximum E_{\max} .

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les résultats de nos simulations.

Enfin, nous terminons par une conclusion.

Chapitre 1 Théorie de la jonction P-N « Radiale »

1.1 Introduction

En physique des semi-conducteurs, une jonction P-N désigne une zone du cristal où le dopage varie brusquement, passant d'un dopage P à un dopage N. Lorsque la région dopée P est mise en contact avec la région N, les électrons et les trous diffusent spontanément de part et d'autre de la jonction, créant ainsi une zone de déplétion où la concentration en porteurs libres est quasiment nulle. La largeur de la zone de déplétion varie avec la tension appliquée de part et d'autre de la jonction. Plus cette zone est courte, plus la résistance de la jonction est faible.

Dans ce chapitre, dans un premier temps nous allons examiner les propriétés d'une jonction P-N plane, ensuite nous présenterons la théorie d'une jonction P-N radiale et donnerons les équations du potentiel, du champ électrique ainsi que la largeur de la zone de charge d'espace et le champ maximum.

1.2 Introduction aux milieux matériels

Selon les propriétés électriques, les matériaux sont classés en trois catégories, conducteurs, isolants et semi-conducteurs, voir Fig.1.1.

- a. **Conducteurs** : Les métaux tels que le fer (Fe), le cuivre (Cu), l'or (Au), l'argent (Ag) et l'aluminium (Al) sont des conducteurs de courant électrique. La présence d'électrons libres dans la couche périphérique (densité $n \approx 10^{22}$ à 10^{23} é/cm) est à l'origine de la conductivité électrique. A température ambiante la résistivité des conducteurs est très faible ($\rho \leq 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$).

- b. Isolants** : Les matériaux qui ont une résistivité ρ supérieure à $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ sont des isolants (matériaux non conducteurs de courant électrique). Parmi ces matériaux : le verre, le mica, la silice (SiO_2) et le carbone (Diamant), La conductivité des isolants est donc très faible ($\sigma=1/\rho$).
- c. Semi-conducteurs** : Cette classe de matériaux se situe entre les métaux (conducteurs) et les isolants (non conducteurs). La résistivité ρ des semi-conducteurs varie de 10^{-3} à $10^{+4} \Omega \cdot \text{cm}$. les électrons libres et les trous mobiles sont les porteurs de charges responsables de la conductivité électrique. Un semi-conducteur peut être soit intrinsèque (pur) ou extrinsèque (dopé) par des impuretés [2].
- Semi-conducteur intrinsèque : la résistivité du silicium pur est de l'ordre de $\rho \approx 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$.
 - Semi-conducteur extrinsèque : la résistivité du silicium dopé par le Bore ou le phosphore est de l'ordre de $10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$.

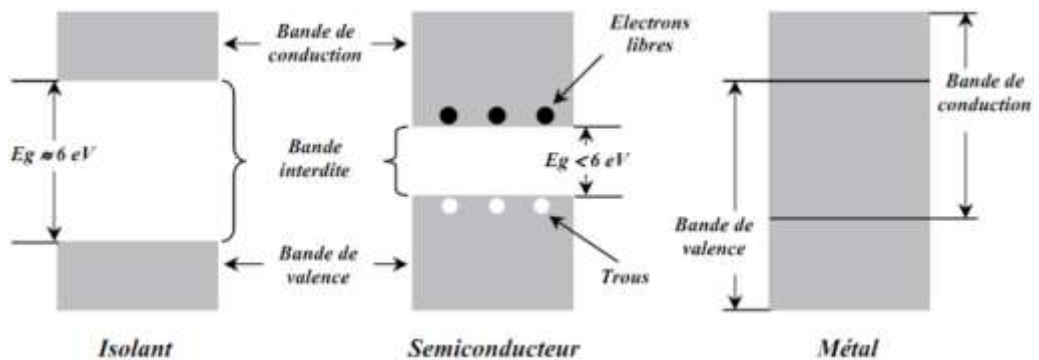


Figure 1.1. Structure en bandes d'énergie des matériaux, Isolants, Semi-conducteurs et Métaux [2]

1.3 La jonction P-N plane

La jonction P-N constitue l'élément de base de toute l'électronique, et constitue le module élémentaire dont dépend le fonctionnement d'un grand nombre de dispositifs à semi-conducteur. Une jonction P-N est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte, c.-à-d. que la

transition de la zone P à la zone N se fait brusquement lorsque l'on assemble les deux régions P et N provoquant la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives, qu'on appelle la zone de charges d'espace (Z.C.E) ; ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique établisse [3].

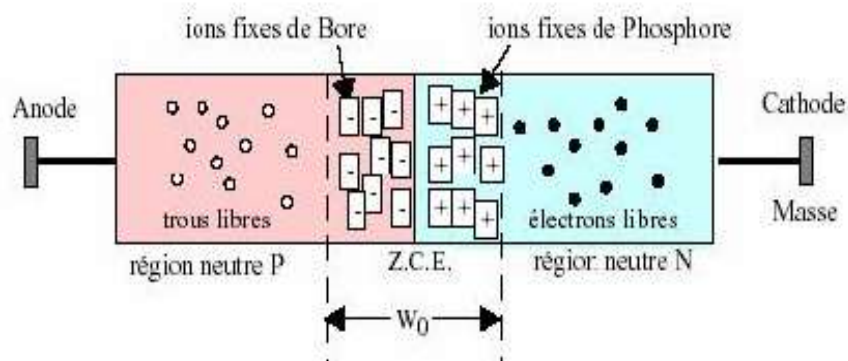


Figure 1.2. Représentation d'une jonction P-N à l'équilibre thermique [3]

Etude Qualitative :

- Jonction : Juxtaposition de deux régions de type opposé.
- Homojonction : contact entre deux régions différentes dopées d'un même matériau.
- Hétérojonction : contact entre deux matériaux de nature différente (exp : métal-S.C).
- Jonction métallurgique : surface séparant les deux régions.

1.3.1 Types de Jonction P-N Plane

Il existe deux types de jonction :

- Jonction Abrupte
- Jonction Graduelle

On s'intéressera à l'homojonction P-N abrupte

a. Jonction P-N Abrupte

Les électrons diffusent vers la région où ils sont minoritaires (région P) et les trous vers la région N. Il y aura donc apparition d'une zone dépeuplée de porteurs appelée zone de charge d'espace (ou zone de transition). Cette zone contient les ions des atomes dopants, donc elle sera positive dans la région N et négative dans la région P. La charge d'espace crée un champ électrique \vec{E}_i (une barrière de potentiel) qui s'oppose à la diffusion des porteurs. L'équilibre thermodynamique est atteint lorsque le courant de diffusion est égal au courant dû au champ électrique interne \vec{E}_i .

b. Jonction P-N graduelle :

Dans une jonction graduelle, la concentration en impuretés est une fonction dépendante de x autour de la région de contact. C'est-à-dire, la différence ($N_d - N_a$) dépend de x entre X_p et X_n , voir Fig.1.3. , cas d'une dépendance linéaire.

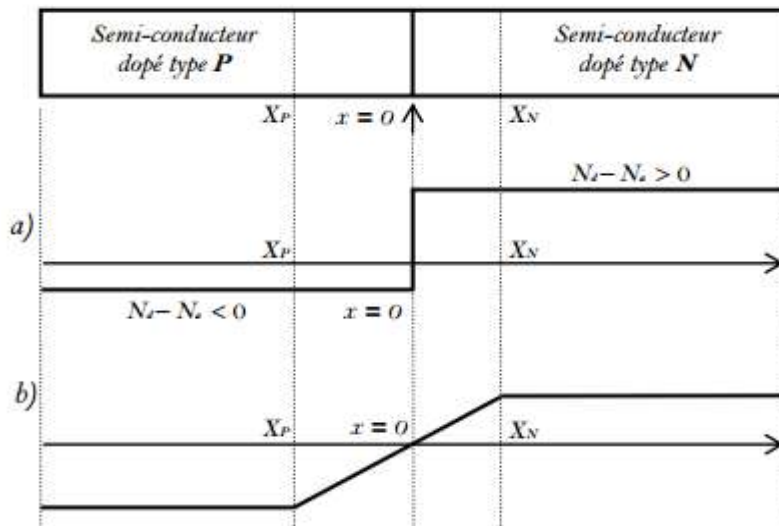


Figure 1.3. Evolution de la différence ($N_d - N_a$). a) abrupte et b) graduelle [2]

1.3.2 La jonction P-N à l'équilibre «non polarisée »

La jonction P-N est dite non polarisée lorsqu'elle est maintenue à une température constante (température ambiante) et est déconnectée de toute source extérieure de courant ou de tension. Sous ces conditions, le courant traversant la diode et la différence de potentiel développée entre ses bornes sont tous les deux nuls :

$$I = 0 \text{ et } V = V_{\text{anode}} - V_{\text{cathode}} = 0$$

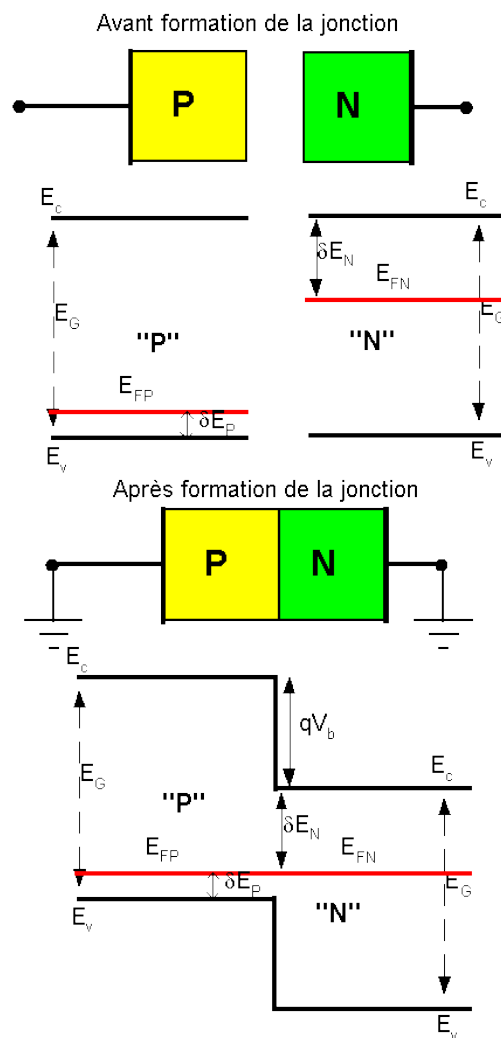


Figure 1.4. Représentation d'une jonction P-N à l'équilibre thermodynamique [4]

1.3.3 La jonction P-N polarisée

Pour polariser la jonction PN on applique une source de tension externe.

a. Polarisation en direct

Quand la borne positive de la source est connectée à la zone P et la borne négative est connectée à la zone N. Cette source extérieure modifie l'état de la jonction, la zone de déplétion devient plus étroite, on a une diminution de la barrière. La circulation des charges est facilitée, on peut avoir circulation de courant dans la jonction. Ce courant sera d'autant plus grand que la diminution de la barrière de potentiel sera importante.

Le courant circule de la zone P vers la zone N (trous de P vers N et électrons de N vers P).

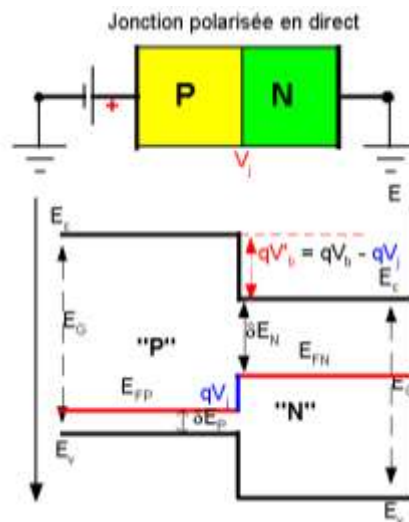


Figure 1.5. Représentation d'une jonction P-N en polarisation directe [4]

b. Polarisation en inverse

Quand la borne négative de la source est connectée à la zone P et la borne positive est connectée à la zone N. La zone de déplétion devient plus large, la barrière de potentiel augmente. La circulation des charges est fortement limitée, on ne peut pratiquement pas avoir de courant dans la jonction, il ne reste qu'un courant lié aux porteurs minoritaires.

Ce courant très faible circule de la zone N vers la zone P, il augmente si la tension de polarisation augmente et est sensible à la température.

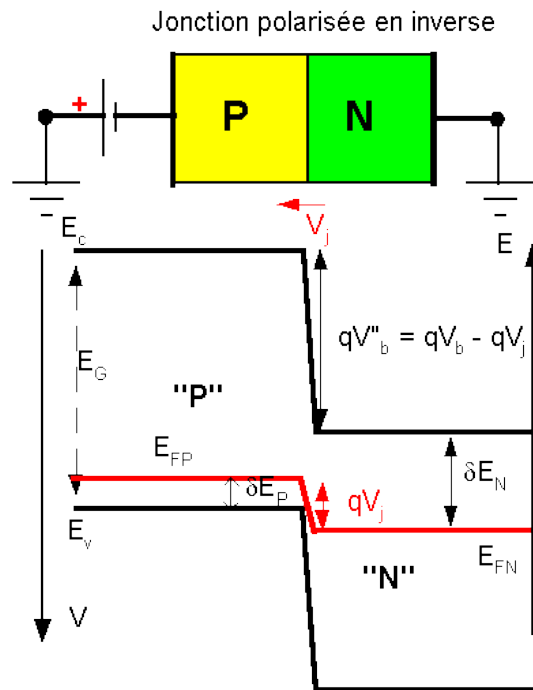


Figure 1.6. Représentation d'une jonction P-N en polarisation inverse [4]

1.3.4 Théorie de la Jonction P-N Plane

L'équation de Poisson s'écrit :

$$\overrightarrow{\text{div.}} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1.1)$$

Où

ρ : La densité de charge

ε : La permittivité du matériau NW

E : Le champ électrique

L'équation de Poisson à une dimension s'écrit :

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1.2)$$

a. Densité de charges $\rho(x)$

Pour résoudre l'équation de Poisson, nous supposons que la charge présente dans le semi-conducteur est seulement due à une distribution homogène d'impuretés. La concentration en porteurs de charges libres est donc négligeable devant N_d et N_a . En plus, la densité de charge est supposée constante dans les deux régions de la zone de déplétion.

Alors, la distribution de charges est donnée par les relations suivantes :

$$\rho = \begin{cases} 0 & \text{pour } x < -X_p \\ -qN_a & \text{pour } -X_p < x < 0 \\ qN_d & \text{pour } 0 < x < X_n \\ 0 & \text{pour } x > X_n \end{cases} \quad (1.3)$$

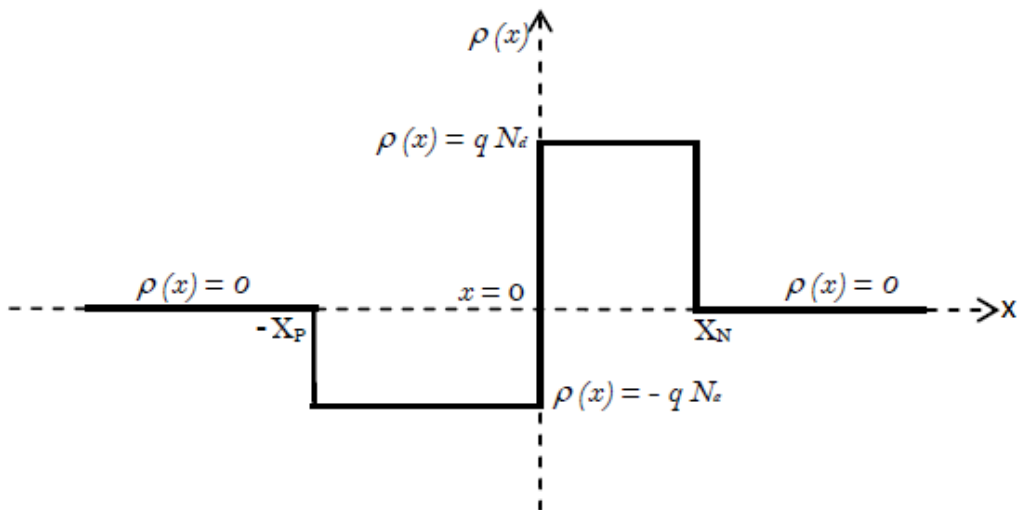


Figure 1.7. Evolution de la densité de charge $\rho(x)$ dans une Jonction P-N plane

Où

X_p : Largeur de la Z.C.E dans la région P

X_n : Largeur de la Z.C.E dans la région N

N_a : Concentration des accepteurs

N_d : Concentration des donneurs

q : charge élémentaire

b. Calcul du champ électrique

Pour déterminer le champ électrique créé dans chaque région il faut intégrer l'équation de Poisson.

- $x < -X_p$: $\rho=0$

Le champ électrique est nul

$$E(x) = 0 \quad (1.4)$$

- $-X_p < x < 0$: $\rho = -qN_a$

$$E(-X_p) = 0$$

$$E(x) = -\frac{qN_a}{\epsilon}(x + X_p) \quad (1.5)$$

- $0 < x < X_n$: $\rho = qN_d$

$$E(X_n) = 0$$

$$E(x) = \frac{qN_d}{\epsilon}(x - X_n) \quad (1.6)$$

- $x > X_n$: $\rho=0$

Le champ électrique est nul

$$E(x) = 0 \quad (1.7)$$

$$E(x) = \begin{cases} 0 & \text{pour } x < -X_p \\ -\frac{qN_a}{\epsilon}(x + X_p) & \text{pour } -X_p < x < 0 \\ \frac{qN_d}{\epsilon}(x - X_n) & \text{pour } 0 < x < X_n \\ 0 & \text{pour } x > X_n \end{cases} \quad (1.8)$$

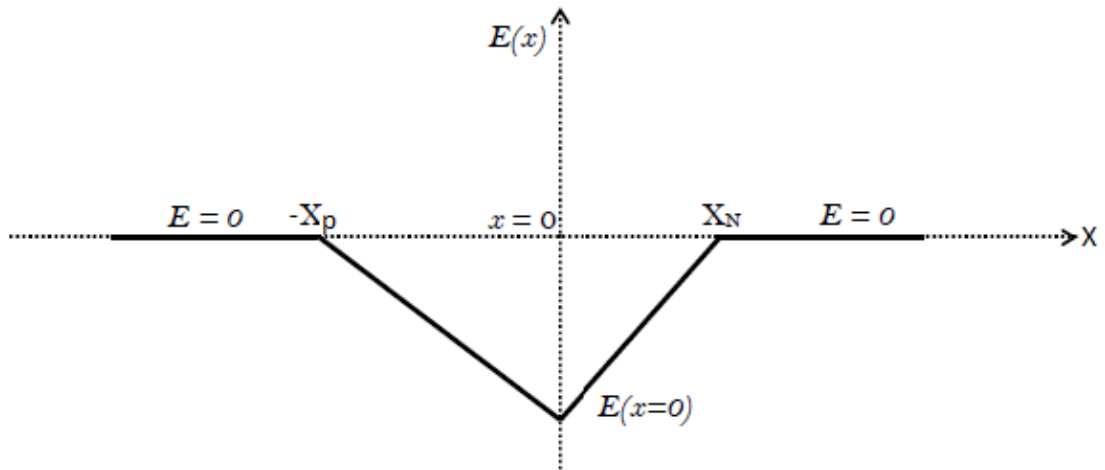


Figure 1.8. Champ électrique dans les différentes régions de la jonction P-N plane

Au point ($x=0$), la continuité du champ électrique impose que :

$$N_d X_n = N_a X_p \quad (1.9)$$

$$E_{\max} = E(0) = -\frac{qN_d}{\epsilon} X_n = -\frac{qN_a}{\epsilon} X_p \quad (1.10)$$

c. Calcul du potentiel électrique

Pour déterminer le potentiel électrique créé dans chaque région il faut intégrer l'équation du champ électrique.

- $x < -X_p$: $\rho=0$

Le champ électrique E est nul, le potentiel est donc constant

$$V(x) = V_p \quad (1.11)$$

- $-x_p < x < 0 : \rho = -qN_a$

$$V(-X_p) = V_p$$

$$V(x) = \frac{qN_a}{2\varepsilon}(x + X_p)^2 + V_p \quad (1.12)$$

- $0 < x < X_n : \rho = qN_d$

$$V(X_n) = V_n$$

$$V(x) = -\frac{qN_d}{2\varepsilon}(x - X_n)^2 + V_n \quad (1.13)$$

- $x > X_n : \rho = 0$

Le champ électrique E est nul, le potentiel est donc constant

$$V(x) = V_n \quad (1.14)$$

$$V(x) = \begin{cases} 0 & \text{pour } x < -X_p \\ \frac{qN_a}{2\varepsilon}(x + X_p)^2 + V_p & \text{pour } -X_p < x < 0 \\ -\frac{qN_d}{2\varepsilon}(x - X_n)^2 + V_n & \text{pour } 0 < x < X_n \\ 0 & \text{pour } x > X_n \end{cases} \quad (1.15)$$

Au point $x=0$, la continuité du potentiel électrique donne :

$$\frac{qN_d}{2\varepsilon}X_n^2 + V_n = -\frac{qN_a}{2\varepsilon}X_p^2 + V_p \quad (1.16)$$

$$V_n - V_p = \frac{qN_d}{2\varepsilon}X_n^2 + \frac{qN_a}{2\varepsilon}X_p^2 \quad (1.17)$$

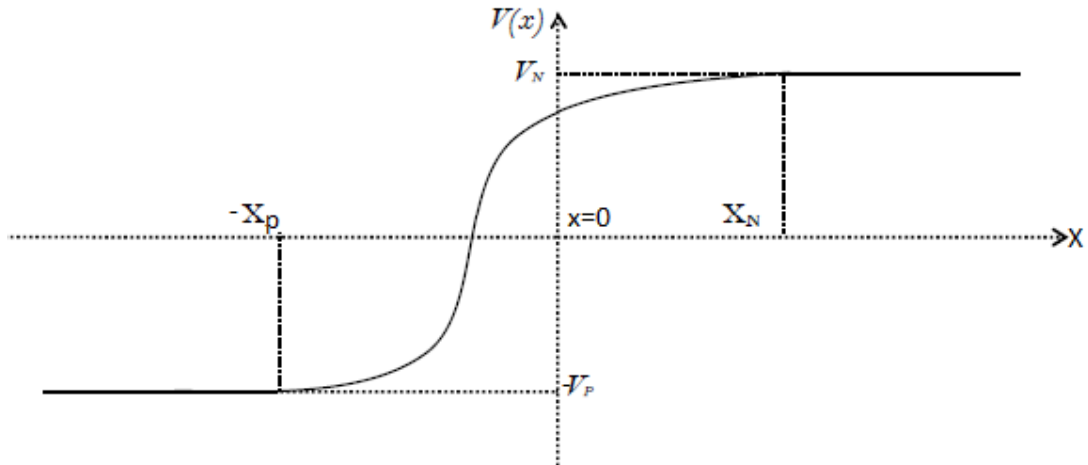


Figure 1.9. Potentiel électrique dans les différentes régions de la jonction P-N plane

d. Calcul de la tension de diffusion V_d (barrière de potentiel)

- Dans la région N :

$$n_N = N_c e^{-\frac{E_{cn}-E_F}{kT}} = N_d \quad (1.18)$$

- Dans la région P

$$n_P = N_c e^{-\frac{E_{cp}-E_F}{kT}} = \frac{n_i^2}{N_a} \quad (1.19)$$

$$V_d = V_{NP} = \frac{E_{cp}-E_{cn}}{q} \quad (1.20)$$

$$\frac{n_N}{p_P} = \frac{N_a N_d}{n_i^2} = e^{-\frac{E_{cp}-E_{cn}}{kT}} \quad (1.21)$$

$$V_d = \frac{E_{cp}-E_{cn}}{q} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \quad (1.22)$$

e. Calcul de la largeur de la zone de charge d'espace W (Zone de déplétion).

Les relations précédentes du potentiel de diffusion permettent de déduire la largeur de la zone de déplétion.

- La largeur de la région dopée P est donnée par la relation :

Les relations (1.9) et (1.17) donnent X_p :

$$X_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_a} \frac{N_d}{N_a+N_d} V_d} \quad (1.23)$$

- La largeur de la région dopée N est donnée par la relation :

Les relations (1.9) et (1.17) donnent X_n :

$$X_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_d} \frac{N_a}{N_a+N_d} V_d} \quad (1.24)$$

- La largeur totale de la zone de charge d'espace est donnée par la relation :

$$W = X_n + X_p$$

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \frac{N_a+N_d}{N_aN_d} V_d} \quad (1.25)$$

1.4 La jonction P-N radiale

Dans l'effort de réaliser le potentiel inexploité de la jonction radiale NW, beaucoup de tentatives importantes ont été faites pour optimiser l'efficacité des dispositifs à base de cette jonction.

Dans cette contribution, l'équation de Poisson est résolue pour une structure P-cœur / N-gaine pour déterminer la répartition du champ électrique. Le modèle est utilisé pour générer des résultats pour une large gamme de paramètres pour examiner la physique sous-jacente de la jonction P-N Radiale.

1.4.1 Les cellules solaires à base de la jonction P-N radiale « Les nanofils »

Les cellules solaires nanostructures sont des cellules de la 3^{ème} génération, l'utilisation des nano fils de silicium cristallin s'inscrit dans la même stratégie que les couches minces : diminuer la quantité de matériau absorbeur tout en conservant des

rendements élevés, les deux avantages des nanofils de silicium que nous détaillerons dans la suite :

- grâce à leur taille sub-micrométrique, l'absorption optique d'une assemblée de nanofils est supérieure à celle d'une couche mince de même épaisseur. Ainsi, la quantité de matériau absorbeur peut être diminuée tout en conservant une bonne absorption optique.
- Le second avantage réside dans la géométrie particulière de la jonction radiale (jonction autour du nanofil). Cette structure permet l'utilisation de silicium de moins bonne qualité électronique tout en conservant une bonne collecte des porteurs. Il est donc possible d'utiliser des nanofils de silicium produits par une technique de croissance catalysée, dont la qualité électronique est réduite par les contaminations métalliques mais qui permet néanmoins de faire croître des nanofils sur de grandes surfaces et sur différents substrats (plaquette de silicium, verre, feuilard métallique).

L'utilisation de nanofils de silicium cristallin permettrait donc de diminuer le rapport prix sur rendement. [4].

1.4.2 Théorie de la jonction P-N radiale

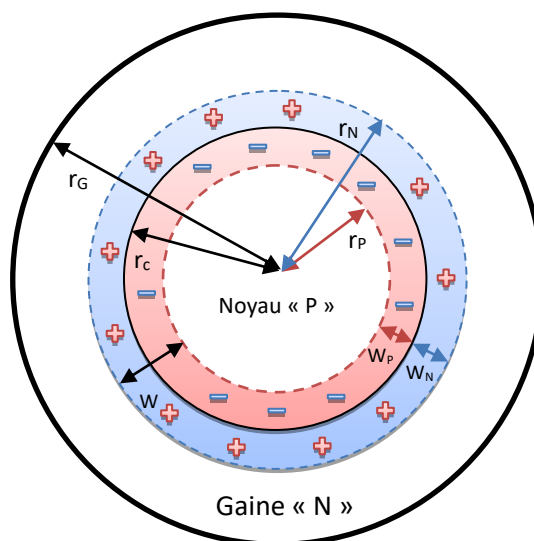


Figure 1.10. Représentation Géométrique de la jonction P-N Radiale

A partir de l'équation de Poisson (1.1), et en invoquant la symétrie d'un long NW cylindrique, l'équation de Poisson peut être écrite en coordonnées cylindriques:

$$\frac{d^2V}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dV}{dr} = -\frac{\rho}{\epsilon} = -\frac{dE}{dr} - \frac{E}{r} \quad (1.26)$$

La solution générale de cette équation pour $V(r)$ et $E(r)$ est donnée par:

$$V(r) = -\frac{\rho}{4\epsilon} r^2 + A \ln(r) + B \quad (1.27)$$

$$E(r) = -\frac{dV}{dr} = \frac{\rho}{2\epsilon} r - \frac{A}{r} \quad (1.28)$$

Où A et B sont des constantes. Ces constantes seront également différentes dans chaque région N et P.

Pour écrire les équations (1.27) et (1.28) explicitement, deux tâches doivent être exécutées : une expression pour ρ doit être trouvée et des conditions aux limites du potentiel et du champ électrique doivent être imposées sur chaque régions dans le nanofil (NW).

a. Densité de charges $\rho(r)$

Pour résoudre l'équation de Poisson, nous supposons que la charge présente dans le semi-conducteur est seulement due à une distribution homogène d'impuretés. La concentration en porteurs de charges libres est donc négligeable devant N_a et N_d . En plus, la densité de charge est supposée constante dans les deux régions de la zone de déplétion

Alors, la distribution de charges est donnée par la relation suivante (figure1.2):

$$\rho(r) = \begin{cases} 0 & \text{pour } 0 < r < r_p \\ -qN_a & \text{pour } r_p < r < r_c \\ qN_d & \text{pour } r_c < r < r_n \\ 0 & \text{pour } r_n < r < r_g \end{cases} \quad (1.29)$$

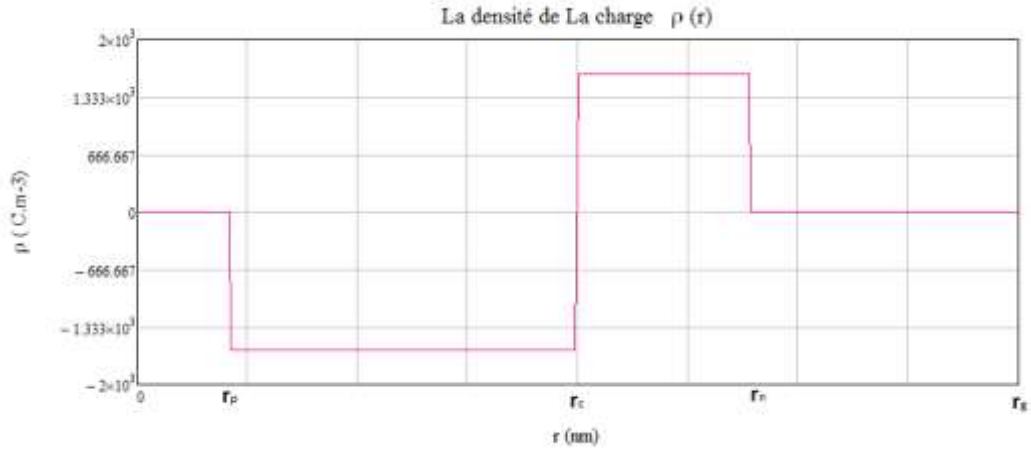


Figure 1.11. Evolution de la densité de charge $\rho(r)$ dans une Jonction P-N radiale

Où

r_c : Rayon du cœur

r_g : Rayon du nanofils (NW)

r_n et r_p : rayons définissant les zones de charges d'espace tels que :

$W_p = r_c - r_p$: largeur de la Z.C.E coté p

$W_n = r_n - r_c$: largeur de la Z.C.E coté n

b. Calcul du champ électrique $E(r)$

Pour déterminer le champ électrique créé dans chaque région il faut intégrer l'équation de Poisson.

- $0 < r \leq r_p$: $\rho = 0$

Le champ électrique est nul

$$E(r) = 0 \quad (1.30)$$

- $r_p \leq r \leq r_c$: $\rho = -qN_a$

$$E(r) = -\frac{qN_a}{2\epsilon} (r^2 - r_p^2) \quad (1.31)$$

- $r_c \leq r \leq r_n$: $\rho = qN_D$

$$E(r) = \frac{qN_D}{2\epsilon} (r_n^2 - r^2) \quad (1.32)$$

- $r_n \leq r \leq r_g$: $\rho = 0$

Le champ électrique est nul

$$E(r) = 0 \quad (1.33)$$

$$E(r) = \begin{cases} 0 & \text{pour } 0 < r \leq r_p \\ -\frac{qN_a}{2\epsilon} (r^2 - r_p^2) & \text{pour } r_p \leq r \leq r_c \\ \frac{qN_d}{2\epsilon} (r_n^2 - r^2) & \text{pour } r_c \leq r \leq r_n \\ 0 & \text{pour } r_n \leq r \leq r_g \end{cases} \quad (1.34)$$

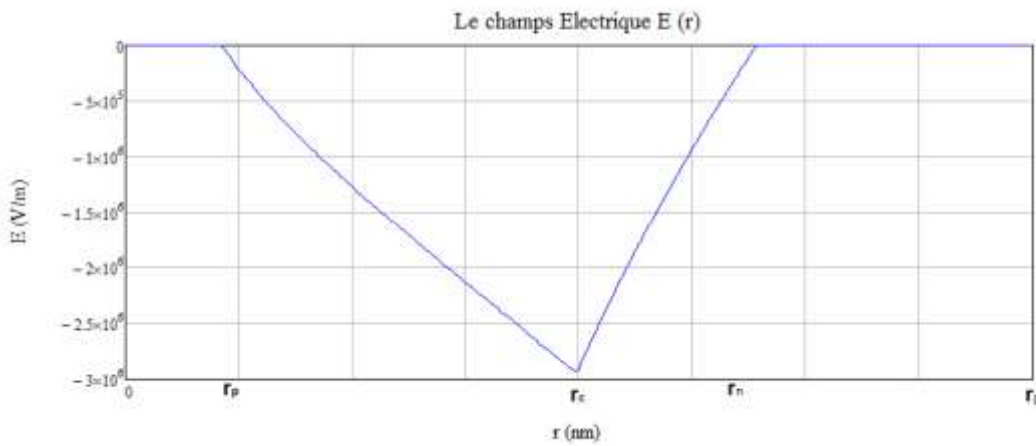


Figure 1.12. Champ électrique dans les différentes régions de la jonction P-N radiale

Au point ($r=r_c$), le champ électrique doit être continu d'où :

$$\frac{qN_d}{2\epsilon} (r_c^2 - r_n^2) = -\frac{qN_a}{2\epsilon} (r_c^2 - r_p^2) \quad (1.35)$$

$$r_n^2 = \frac{N_a}{N_d} (r_c^2 - r_p^2) + r_c^2 \quad (1.36)$$

$$r_n = \sqrt{\frac{N_a}{N_d} (r_c^2 - r_p^2) + r_c^2} \quad (1.37)$$

Au point ($r=r_c$), le champ électrique est maximum :

$$E_{max} = E(r_c) = \frac{qN_a}{2\epsilon} (r_c^2 - r_p^2) = \frac{qN_d}{2\epsilon} (r_n^2 - r_c^2) \quad (1.38)$$

c. Calcul du potentiel électrique $V(r)$

Pour déterminer le potentiel électrique créé dans chaque région il faut intégrer l'équation du champ électrique.

- $0 < r \leq r_p$

Le champ électrique E est nul, le potentiel est donc constant

$$V(r) = V_p \quad (1.39)$$

- $r_p \leq r \leq r_c$:

$$V(r) = -\frac{qN_a r_p^2}{2\epsilon} \left[\frac{1}{2} + \ln\left(\frac{r}{r_p}\right) - \frac{r^2}{r_p^2} \right] + V_p \quad (1.40)$$

- $r_c \leq r \leq r_n$

$$V(r) = \frac{qN_d r_n^2}{2\epsilon} \left[\frac{1}{2} + \ln\left(\frac{r}{r_n}\right) - \frac{r^2}{r_n^2} \right] + V_n \quad (1.41)$$

- $r_n \leq r \leq r_g$

Le champ électrique E est nul, le potentiel est donc constant

$$V(r) = V_n \quad (1.42)$$

$$V(r) = \begin{cases} V_p & \text{pour } 0 < r \leq r_p \\ -\frac{qN_a r_p^2}{2\epsilon} \left[\frac{1}{2} + \ln\left(\frac{r}{r_p}\right) - \frac{r^2}{2r_p^2} \right] + V_p & \text{pour } r_p \leq r \leq r_c \\ \frac{qN_d r_n^2}{2\epsilon} \left[\frac{1}{2} + \ln\left(\frac{r}{r_n}\right) - \frac{r^2}{2r_n^2} \right] + V_n & \text{pour } r_c \leq r \leq r_n \\ V_n & \text{pour } r_n \leq r \leq r_g \end{cases} \quad (1.43)$$

Au point ($r=r_c$), la continuité du potentiel donne :

$$-\frac{qN_a r_p^2}{2\epsilon} \left[\frac{1}{2} + \ln\left(\frac{r_c}{r_p}\right) - \frac{r_c^2}{2r_p^2} \right] + V_p = \frac{qN_d r_n^2}{2\epsilon} \left[\frac{1}{2} + \ln\left(\frac{r_c}{r_n}\right) - \frac{r_c^2}{2r_n^2} \right] + V_n \quad (1.44)$$

$$V_n - V_p = -\frac{qN_a r_p^2}{2\epsilon} \left[\frac{1}{2} + \ln\left(\frac{r_c}{r_p}\right) - \frac{r_c^2}{2r_p^2} \right] - \frac{qN_d r_n^2}{2\epsilon} \left[\frac{1}{2} + \ln\left(\frac{r_c}{r_n}\right) - \frac{r_c^2}{2r_n^2} \right] \quad (1.45)$$

$$V_n - V_p = \frac{q}{4\epsilon} [N_d r_n^2 (2 \ln\left(\frac{r_n}{r_c}\right) - 1) + r_c^2 (N_a + d) + N_a r_p^2 (2 \ln\left(\frac{r_p}{r_c}\right) - 1)] \quad (1.46)$$

On a aussi :

A l'équilibre:

$$V_n - V_p = V_d = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \quad (1.47)$$

Et hors équilibre :

$$V_n - V_p = V_d - V_a$$

$$V_n - V_p = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} - V_a \quad (1.48)$$

Où

V_d : étant la tension de diffusion

V_a : la tension appliquée

La résolution des équations (1.37, 1.46) par des méthodes numériques permet de déterminer r_n , r_p donc W_n et W_p ainsi que $E(r)$, $V(r)$ et E_{max} .

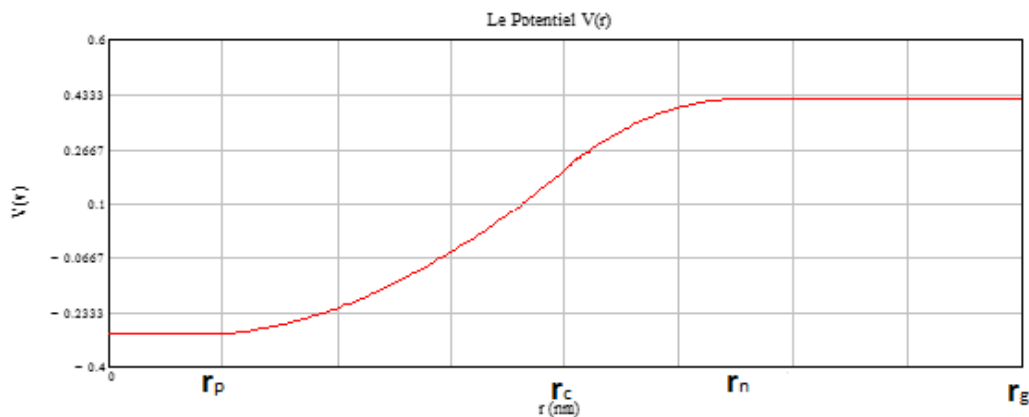


Figure 1.13. Potentiel électrique dans les différentes régions de la jonction P-N Radiale

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'analyse théorique de la jonction P-N plane et radiale. Dans un premier temps, nous avons examiné les différentes notions et propriétés d'une jonction P-N plane, ensuite nous avons étudié la théorie d'une jonction P-N plane ainsi que circulaire et donné les équations du champ électrique radiale, du potentiel électrique, de la largeur de la zone de charge d'espace et du champ maximum.

Chapitre 2 Simulations et Résultats

2.1 Introduction

La simulation de La Jonction P-N Radiale est un moyen efficace et rapide pour mettre en lumière les caractéristiques électrostatiques de cette dernière. En se servant des logiciels et outils de simulation comme COMSOL et MATHCAD, des logiciels de simulation numérique qui permettent de simuler de nombreuses applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

L'objectif essentiel de ce chapitre est d'illustrer graphiquement dans un premier temps les différents paramètres électrostatiques : Le potentiel, Le champ électrique ainsi que la densité de charge à travers la Jonction P-N Radiale en Silicium.

Ensuite, dans un deuxième temps, à l'aide de l'outil MATHCAD et en utilisant le modèle théorique de la jonction on va étudier l'effet de la variation des paramètres structurels de la jonction en Silicium sur la largeur de la zone charge d'espace Z.C.E telles que la variation du rayon du noyau et la variation des différents paramètres : N_a , N_d et la tension de la polarisation externe V_a , et enfin représenter la caractéristique courant-tension de la jonction circulaire.

Les résultats doivent être validés en le comparant avec les résultats d'un deuxième outil de simulation « COMSOL » afin de mettre en évidence la précision du modèle numérique électrostatique de la jonction P-N radiale.

2.2 Logiciels utilisés

2.2.1 Principe de MATHCAD

MATHCAD est un logiciel permettant de réaliser des calculs scientifiques. Son interface permet de réaliser des rapports, c'est-à-dire des documents formatés et des textes nécessaires à la compréhension d'un projet d'ingénierie.

2.2.2 Principe de COMSOL

COMSOL est un environnement et un outil de simulation ingénierie des applications du monde réel, il facilite le processus de modélisation à tous les niveaux : définition de la géométrie, maillage, spécification de la physique, optimisation, et visualisation des résultats. L'idée est de représenter aussi précisément que possible les effets observés dans la réalité. Pour cela il est nécessaire de prendre en compte les couplages multiphysiques.

2.3 Simulations et Résultats

Nous nous sommes concentrés sur l'homo-jonction P-N coaxiale du NW, constituée d'un noyau intérieur de type p avec une concentration d'accepteurs N_a et un rayon r_c , entouré par une gaine extérieure de type N avec une concentration de donneurs N_d et d'épaisseur r_g . La structure considérée est illustrée sur la Fig.2.2. Puis nous varions les paramètres afin d'analyser leur influence sur la Z.C.E et E_{max} .

2.3.1 Evolution de la densité de charges, du champ électrique et du potentiel

La figure 2.1 : a), b) et c) représente successivement la variation de la densité de charge $\rho(r)$, du champ électrique $E(r)$ et du potentiel $V(r)$ sur la largeur de la jonction radiale avec des paramètres:

$$r_c=600 \text{ nm}, N_a=N_d=10^{22} \text{ m}^{-3}, n_i=10^{16} \text{ m}^{-3}, \epsilon= 11,68 \text{ (pour le Silicium)}.$$

Dans ce qui suit on va utiliser ces paramètres pour étudier et déterminer les différents effets électrostatiques.

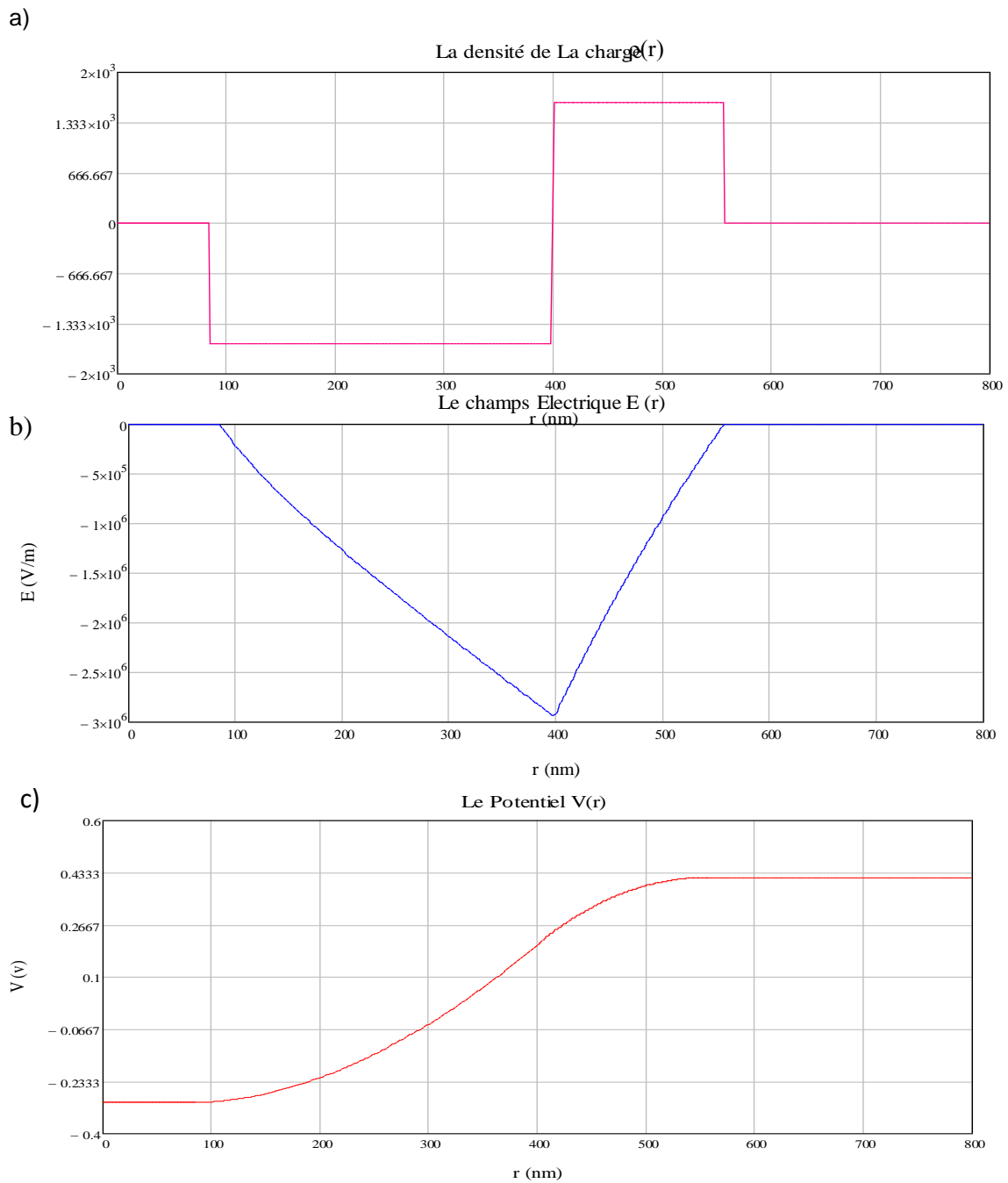


Figure 2.1. Evolution de la densité de charge $\rho(r)$, du champ électrique $E(r)$ et du potentiel électrique $V(r)$ dans les différentes régions de la jonction P-N Radiale

2.3.2L'élargissement de la Z.C.E « W »

Le but de cette simulation est de vérifier le phénomène d'élargissement de la Z.C.E « W » introduite par la variation des paramètres : r_c , N_a , N_d et la tension de polarisation V_a , pour cette raison on a réalisé un model sous COMSOL représentant notre géométrie radiale de la jonction, en parallèle on a évalué les équations de notre modèle théorique sous MATHCAD.

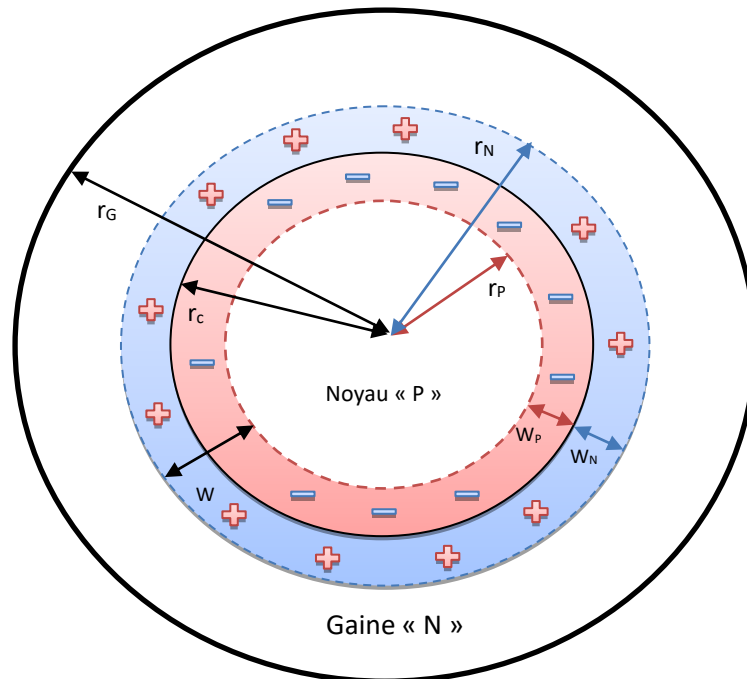


Figure 2.2. Représentation géométrique de la jonction P-N Radiale

a. Variation de la Z.C.E « W », W_p , W_n en fonction de r_c

Les courbes représentées dans la figure 2.3 montrent la variation de la zone de charge d'espace dans la région P « W_p » et N « W_n » de la jonction circulaire et l'épaisseur totale de la zone « W » en fonction le rayon de noyau « r_c ». On remarque que lorsqu'on augmente le rayon du noyau de 400 nm à 800 nm, W_p diminue de 306 nm à 237 nm et W_n augmente de 150 nm à 178 nm, ce qui fait que W qui est la somme des deux zones diminue lentement de 456 nm à 415 nm.

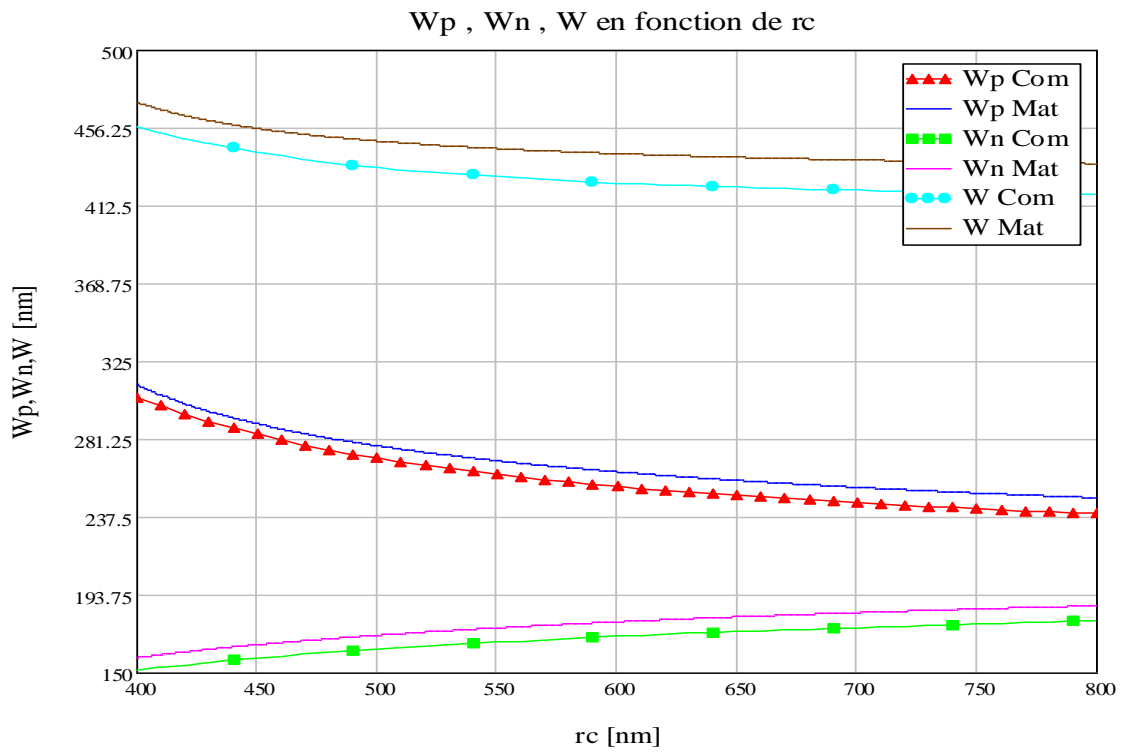
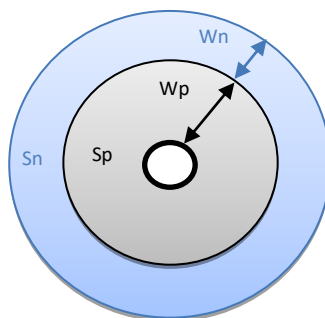


Figure 2.3 : Evolution de la Z.C.E en fonction de r_c

b. Variation de la Z.C.E en fonction de N_a

Le graphique de la figure 2.4 montre la variation de la Z.C.E : W_p , W_n et l'épaisseur totale de la zone « W » en fonction la concentration des impuretés de type accepteur « N_a ». On constate dans un premier temps que pour la même concentration de dopage $N_a=N_d=10^{22}m^{-3}$, W_p est supérieur à W_n cela est due à la géométrie radiale de la jonction, la largeur de la surface dans un cercle diffère en fonction de la longueur de rayon.



$S_p=S_n$ par contre $W_p \gg W_n$. En suite, lorsque N_a augmente, la Z.C.E est plus large côté N (W_n) où le dopage est plus faible, plus Les trous majoritaires augment du côté "P" plus ils ont tendance à diffuser du côté "N" là où ils sont minoritaires. Quand un trou arrive du côté "N", il se recombine avec un électron libre et en disparaissant, il laisse du côté "P" un atome accepteur ionisé négativement non compensé électriquement.

Pour la valeur $N_a=1,4 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ on a $W_n=W_p$. Il est évident qu'on peut avoir une jonction radiale symétrique à condition que le noyau soit plus fortement dopé que la gaine.

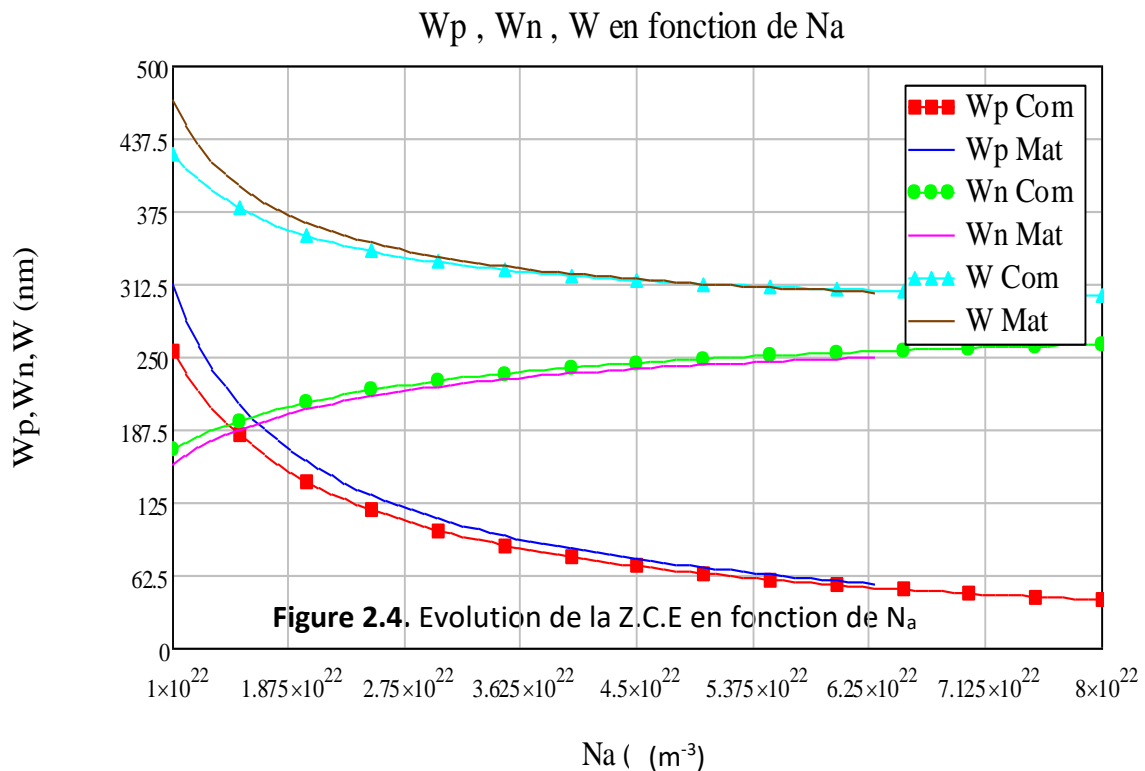


Figure 2.4. Evolution de la Z.C.E en fonction de N_a

c. Variation de la Z.C.E en fonction de N_d

Le graphique de la figure 2.5 représente la variation de la zone de charge d'espace W_p , W_n et W en fonction de la concentration en impuretés de type donneur N_d . Dans ce cas, nous avons obtenu presque les mêmes résultats qu'auparavant, sauf que W_p

augmente lentement alors que W_n diminue rapidement ce qui a fait diminuer W qui est la somme de deux courbes, mais nous pouvons toujours expliquer ce résultat par l'effet de dopage et la diffusion des électrons vers le côté P.

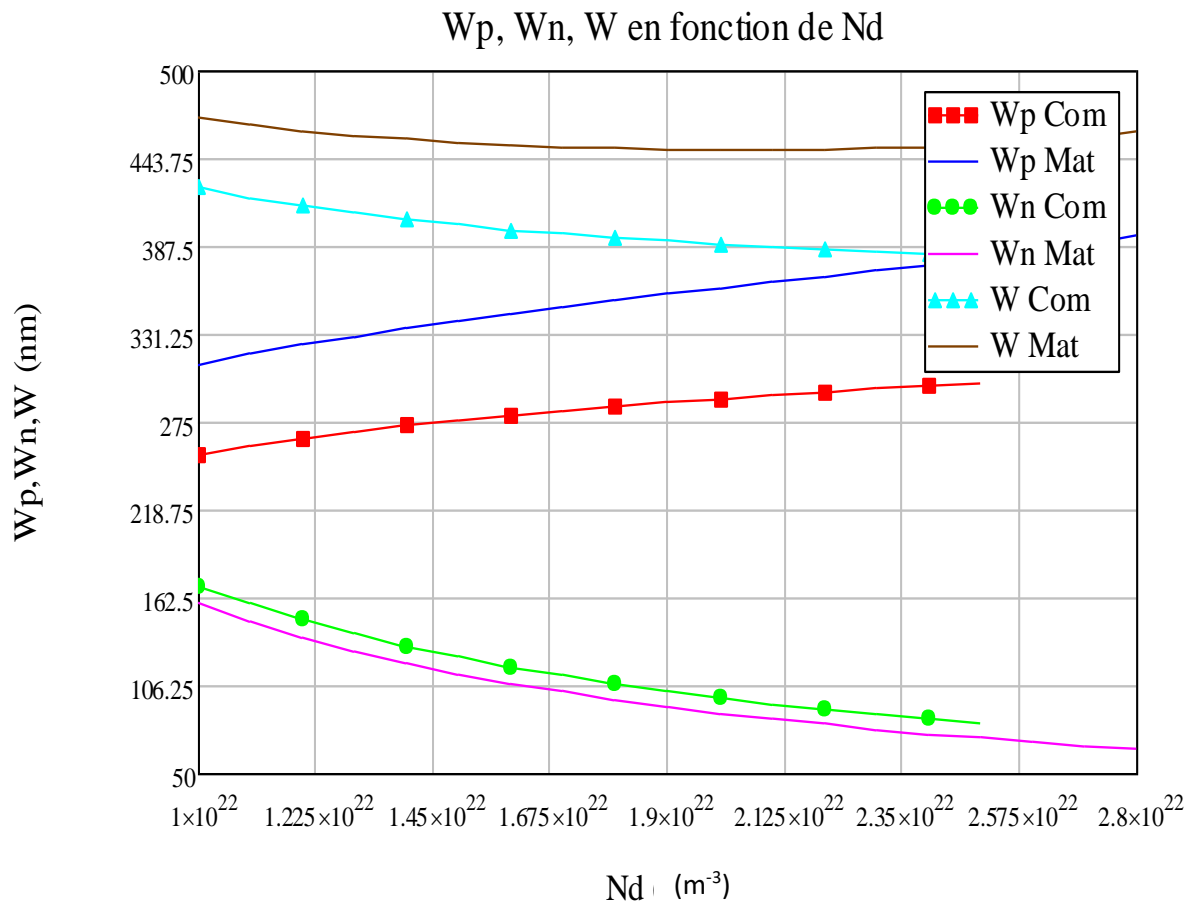


Figure 2.5. Evolution de la Z.C.E en fonction de N_d

d. Variation de la Z.C.E en fonction de V_a

Le graphique de la figure 2.6 représente la variation de la zone charge d'espace W_p , W_n et W en fonction d'une tension de polarisation directe et indirecte « V_a ».

Lorsque l'on applique une différence de potentiel, la jonction n'est plus à l'équilibre, on remarque que lorsque la tension de polarisation varie entre [-1V ; 1V], W_p diminue de 300 nm à 25,15 nm, de la même façon W_n diminue aussi de 187 nm à 34,62 nm, ce qui fait que W diminue rapidement de 487 nm à 59,77 nm.

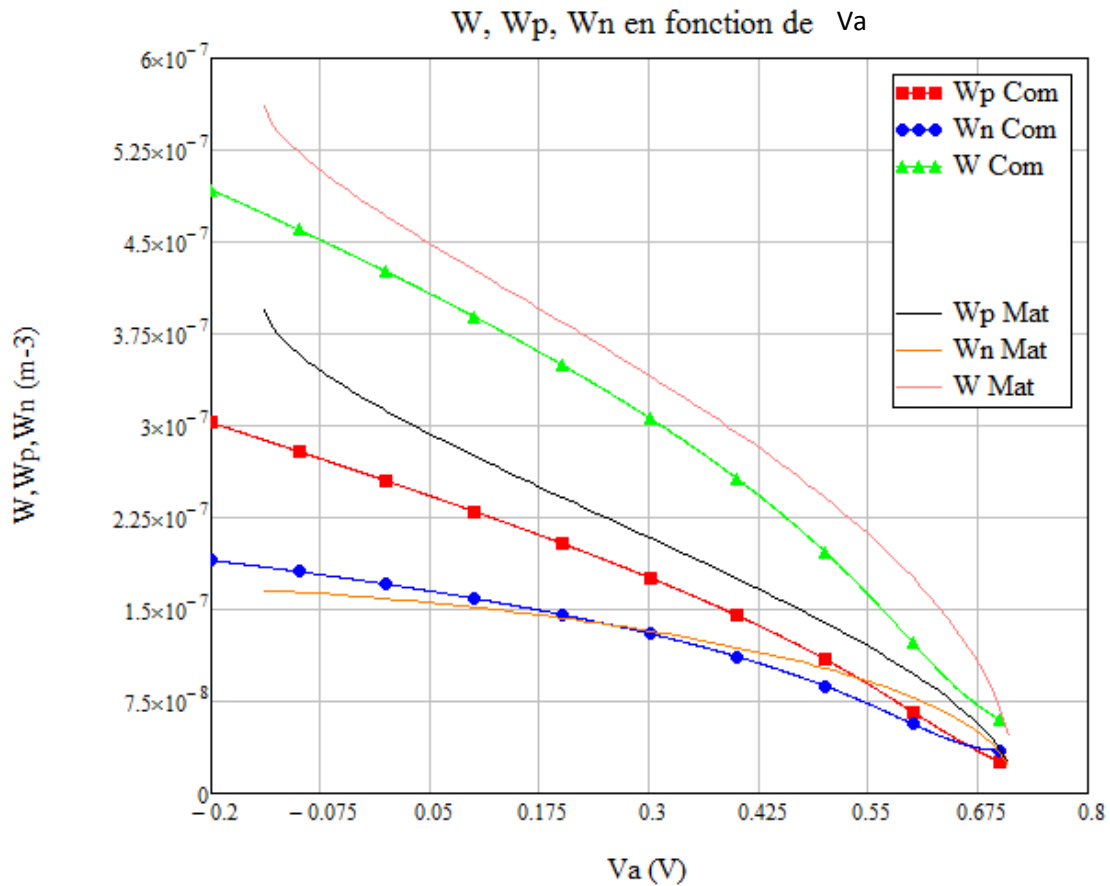


Figure 2.6. Evolution de la Z.C.E en fonction de V_a

2.3.3 Variation du champ électrique maximum « E_{max} »

Le but de cette simulation est de vérifier la variation du champ électrique maximum E_{max} introduite par la variation des paramètres de la jonction : r_c , N_a , N_d et la tension de polarisation V_a , on va utiliser le même modèle sous COMSOL et le théorique sous MATHCAD.

a. Variation de E_{max} en fonction de r_c

Le graphique de la figure 2.7 représente la variation de E_{max} en fonction du rayon du noyau r_c . Lorsqu'on augmente le rayon du noyau de 400 nm à 800 nm, E_{max} augmente de 2.774×10^6 V/m à 3.0×10^6 V/m.

Le champ électrique est toujours négatif, son amplitude est maximum dans le plan de la jonction métallurgique, dans notre cas la jonction métallurgique se situe à $r=r_c$.

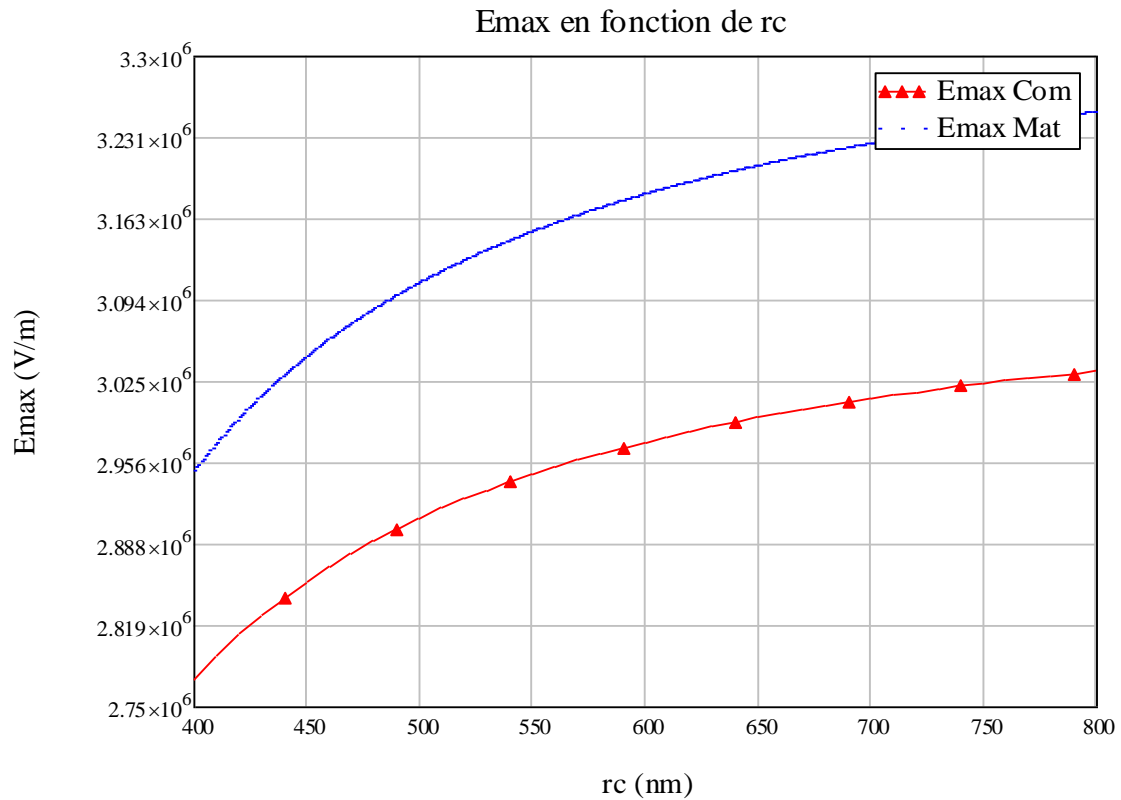


Figure 2.7 Evolution de E_{max} en fonction de r_c

b. Variation de E_{max} en fonction de N_a

Le graphique de la figure 2.8 représente la variation de E_{max} en fonction de la concentration en impuretés de type accepteur « N_a ». On remarque une augmentation du champ électrique maximum E_{max} avec la concentration en impuretés N_a.

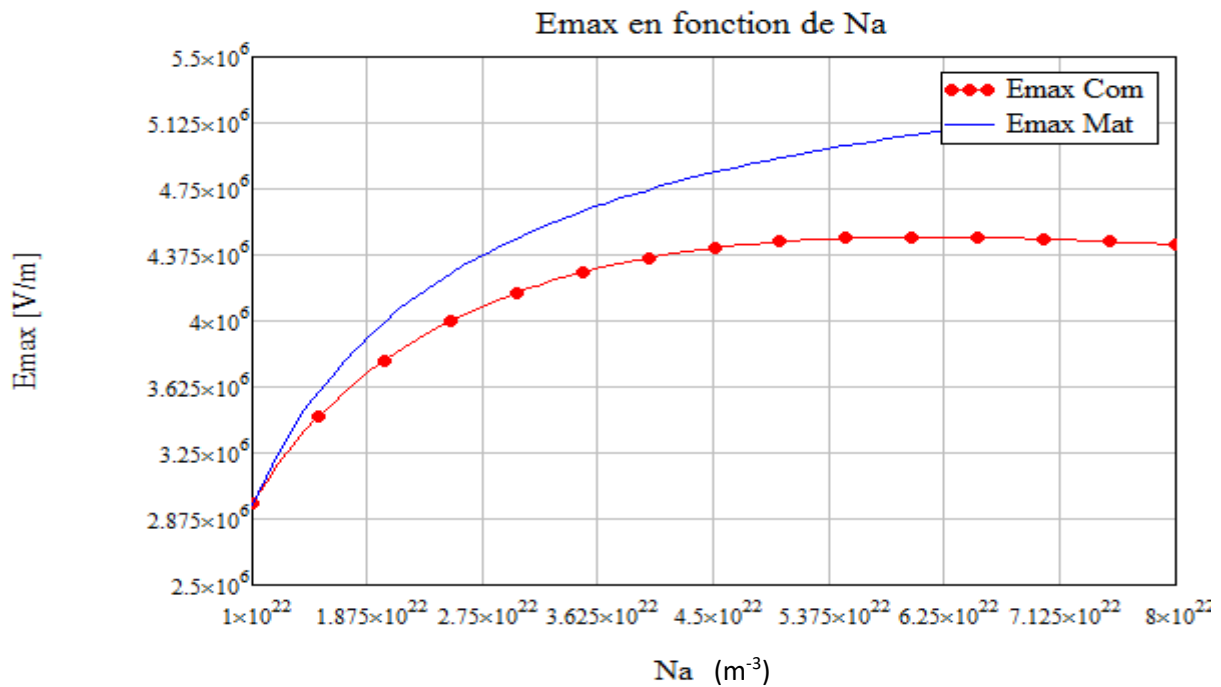


Figure 2.8. Evolution de E_{max} en fonction de N_a

c. Variation de E_{max} en fonction de N_d

Le graphique de la figure 2.9 représente la variation de E_{max} en fonction de la concentration en impuretés de type donneur « N_d ». On remarque une augmentation du champ électrique maximum E_{max} avec la concentration en impuretés N_d.

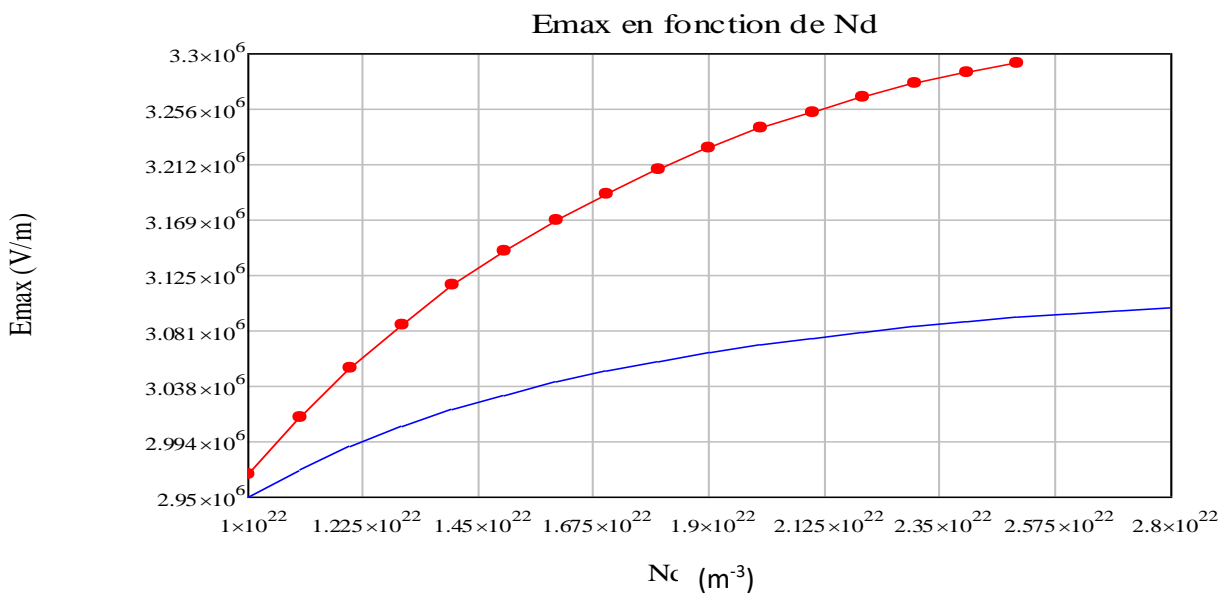


Figure 2.9. Evolution de E_{max} en fonction de N_d

d. Variation de E_{\max} en fonction de V_a

Le graphique de la figure 2.10 représente la variation de E_{\max} en fonction d'une tension de polarisation directe et indirecte « V_a ». On remarque que le champ électrique E_{\max} décroît légèrement avec l'augmentation de la tension de polarisation V_a .

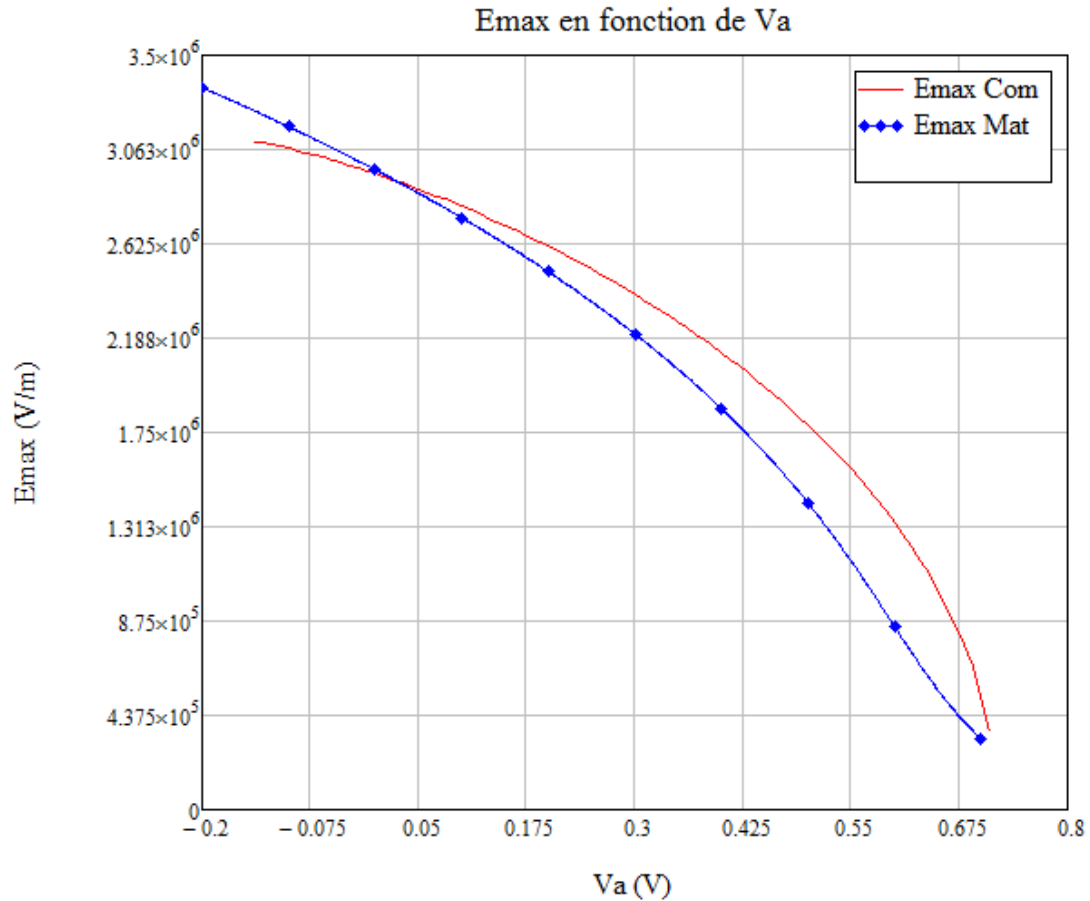


Figure 2.10. Evolution de E_{\max} en fonction de V_a

2.3.4 La caractéristique courant-tension de la jonction P-N radiale

Le but de cette simulation est de vérifier la caractéristique courant-tension de la Jonction Radiale introduite par la variation de la tension de polarisation V_a , on utilise toujours le même modèle sous COMSOL.

La figure 2.11 représente la caractéristique courant-tension. On remarque que le courant est très faible pour une polarisation indirecte dans l'intervalle $[-1V,0V]$, et le

courant augmente sous forme exponentiel pour une polarisation directe dans l'intervalle [0,1V].

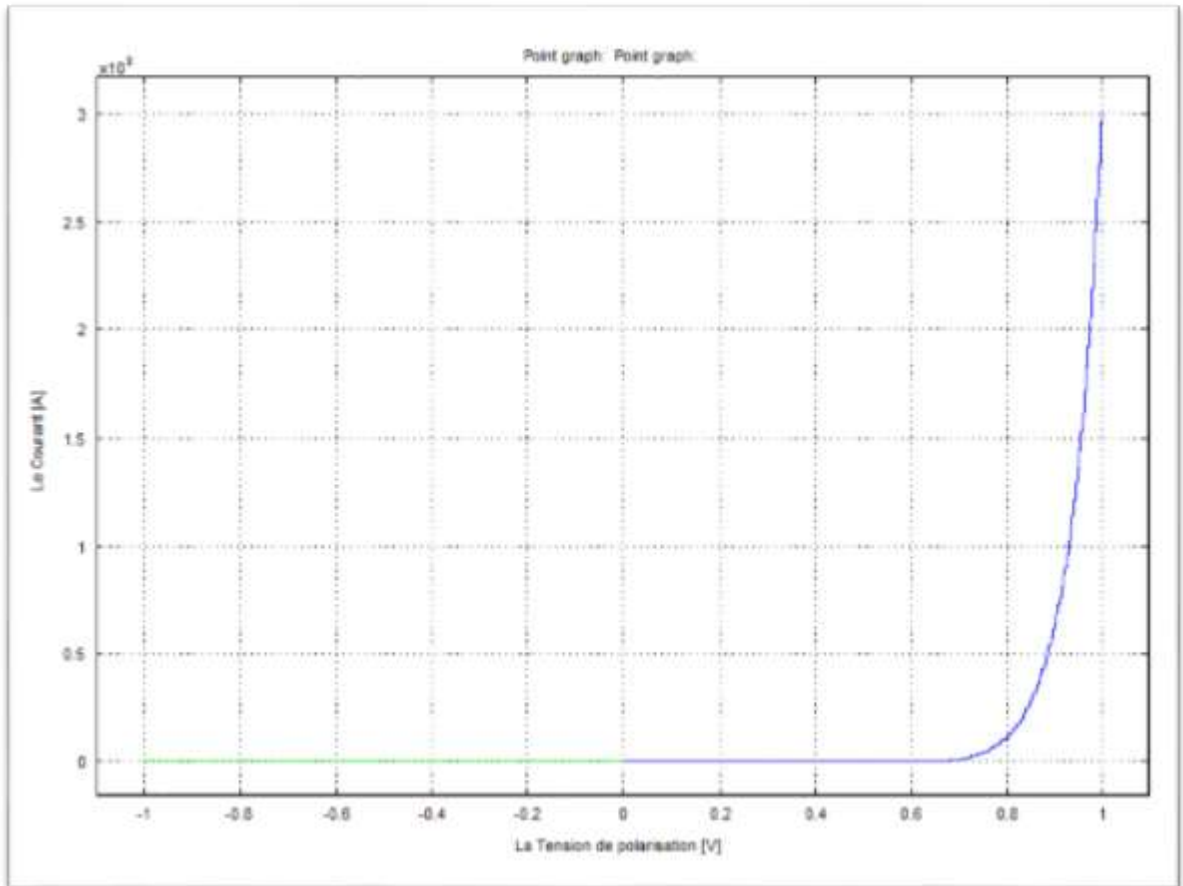


Figure 2.11. Evolution de la caractéristique courant-tension de la Jonction P-N Radiale

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé une jonction P-N radiale à base de Silicium (Si).

Nous nous sommes intéressés à la présentation des caractéristiques électrostatiques du modèle que nous avons simulé. Nous avons représenté le champ électrique, le potentiel ainsi que la densité de charge.

La variation de l'élargissement de la zone de charge d'espace (Z.C.E) W et du champ électrique maximum E_{\max} en fonction des différents paramètres : r_c , N_a , N_d et V_a a été étudiée.

Nous avons aussi étudié la caractéristique courant-tension de la jonction P-N radiale.

Conclusion générale

L'utilisation des nano-fils de silicium cristallin à base d'une jonction P-N Radiale dans la construction photovoltaïque s'inscrit dans la même stratégie de diminution de la quantité de matériau absorbeur tout en conservant des rendements élevés. Dans ce travail de recherche, nous avons eu la chance d'étudier cette importante structure radiale et prouver l'influence des différents paramètres impliqués dans la construction de la structure.

Dans un premier temps, nous avons présenté un modèle numérique à travers les équations du champ électrique, du potentiel et de la densité de charge pour les deux jonctions plane et radiale. Nous avons ainsi dérivé ces équations pour déduire la variation de la largeur de la zone de charge d'espace et le champ maximum en fonction des paramètres de la jonction.

Au vu des résultats obtenus lors de notre simulation, nous avons constaté que les paramètres de la jonction tels que le rayon du noyaux, la concentration des impuretés donneurs et accepteur ainsi que la tension de polarisation jouent un rôle important sur la largeur de la zone de charge d'espace et le champ maximum de la jonction et donc affectent directement le rendement global de la jonction P-N radiale et les différents dispositifs réalisés par cette structure telles que les cellules solaire à base de nano-fils.

Cette étude représente en même temps une démonstration sur la théorie de la jonction P-N radiale et aussi une base solide pour développer et améliorer les domaines de l'énergie renouvelable et photovoltaïque.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]- R. R. LaPierre, Journal of Applied Physics 109, 034311 (2011).
« Numerical model of current-voltage characteristics and efficiency of GaAs nanowire solar cells »
- [2]- Dr. AH. SOUICI « *Physique des Semi-conducteurs* » 2013-2014
- [3]- Sari-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled, Journal of Electron Devices, Vol. 5, 2007, pp. 122-126 « ETUDE DE LA JONCTION PN D'UN SEMI-CONDUCTEUR A L'EQUILIBRE THERMODYNAMIQUE »
- [4]- Bernard BOITTIAUX , 2004 « La Jonction PN Id idéale »
- [5]- D. David Kohen, thèse Doctorat, Université Grenoble Alpes, 2012. France
« Étude des nanofils de silicium et de leur intégration dans des systèmes de récupération d'énergie photovoltaïque »