

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 البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

AGUEMMOUME Nour El Houda

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique option Micro-Optoélectronique

Thème

Étude de l'influence des anneaux de garde sur les performances d'un dispositif semi-conducteur de type diode à jonction p-n

Proposé par : Mr. OUSSALAH Slimane & Mr. AISSAT Abdelkader

Année Universitaire 2014-2015

Remerciements

Le travail présenté dans ce mémoire, a été effectué au Département d'Electronique, Faculté de Technologie, de l'Université SAAD DAHLAB de BLIDA.

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

Je tiens à remercier :

Monsieur BENSEBTI , chef de département d'Electronique, de nous avoir permis d'effectuer ce MASTER, et pour tous les moyens mis à notre disposition pour la réussite de notre travail.

Monsieur Slimane OUSSALAH, chercheur au sein de la Division Microélectronique et Nanotechnologie et Directeur Adjoint du CDTA. Je lui suis extrêmement reconnaissante pour sa confiance, sa disponibilité, sa patience et aussi pour ses grandes qualités humaines et morales.

Monsieur A.AISSAT professeur habilité à l'Université de Blida, d'avoir accepté de me co-encadrer. Surtout pour ses remarques et ses conseils très efficaces.

Je voudrais aussi remercier Messieurs le président M. Said NACER et les autres membres du jury M. Slimane OUSSALAH, M. Abdelkader AISSAT, M. ALYAN qui ont accepté et m'ont fait l'honneur de bien vouloir juger ce travail. Comme je les remercie aussi pour la lecture attentive de ce manuscrit.

Que ma mère, mes sœurs et mon frère trouvent ici mes chaleureux remerciements pour leurs diverses aides.

Mes remerciements vont à mes amis et collègues pour leur soutien à mon travail et leurs encouragements.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce travail.

ملخص:

في هذا العمل صببنا اهتمامنا على دراسة بواسطة تحاكي جهاز اشباه النواقل من نوع ثنائي الصمام للتقاطع p-n من اجل مراقبه تأثير الحلقات الحارسة على أداء هذا التقاطع. هذا الاخير يوضح خصائص مهمة نخص بالذكر انهيار التوتر الكهربائي الذي يكون كبيرا عندما نضيف الحلقات الحارسة لهذا التقاطع . ومنه تحسين انهيار التوتر الكهربائي تعتمد على الحلقات الحارسة. و لقد درسنا ايضا مختلف العوامل التي تميز التقاطع بوجود الحلقة الحارسة التي تساعدنا على تحديد عدد و موقع هذا الاخير.

كلمات المفاتيح: الحلقات الحارسة; الصمام الثنائي انهيار; التوتتر; تحاكي.

Résumé :

Dans ce travail nous sommes intéressés à l'étude par la simulation d'un dispositif semi-conducteur de type diode a jonction p-n afin d'observer l'influence des anneaux de garde sur les performances de cette jonction. Cette dernière présente des caractéristiques importantes notamment sa tension de claquage, cette dernière sera grande lors de l'ajout d'un anneau de garde à cette jonction, d'où l'amélioration de la tension de claquage dépend des anneaux de garde. Nous avons également étudié les différents paramètres caractérisant la jonction p-n avec anneau de garde qui nous ont servi à préciser le nombre et le positionnement de ce dernier.

Mots clés : anneau de garde ; diode ; tension de claquage ; simulation.

Abstract :

In this work we are interested to study by simulation of a semiconductor device like a diode type p-n junction to observe the influence of guard rings on their performances. This latter has important characteristics including its breakdown voltage, this voltage will be great when adding a guard ring at this junction, thereby improving the breakdown voltage depends on the guard rings. We also are studying the different parameters characterizing the p-n junction with guard ring that served us to specify the number and positioning of the latter.

Keywords : guard ring ; diode ; breakdown voltage ; simulation.

Listes des acronymes et abréviations

- p : Dopage de type accepteur (densité des trous (cm^{-3})).
- n : Dopage de type donneur (densité des électrons (cm^{-3})).
- E_{max} : Champ électrique maximum d'une jonction (V/cm).
- E_{crit} : Champ électrique critique dans le semi-conducteur (V/cm).
- q : Charge électrique élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19}$).
- W : Largeur de charge d'espace (cm).
- ϵ_s : Permittivité diélectrique relative du semi-conducteur (11.9).
- ϵ_0 : Permittivité absolue du vide ($8.85 \cdot 10^{-14}$ F/cm).
- μ_n : Mobilité des électrons (cm^2/Vs).
- μ_p : Mobilité des trous (cm^2/Vs).
- T : Température (k).
- ∇ : Gradient.
- V : La tension (v).
- P : La résistivité ($\Omega\text{-cm}$).
- N_a : Concentration des donneurs (cm^{-3}).
- N_p : Concentration des accepteurs (cm^{-3}).
- G_n : Taux de génération des électrons.
- G_p : Taux de génération des trous.
- V_{BR} : Tension de claquage (breakdown voltage).
- R_n : Taux de recombinaison des électrons.
- R_p : Taux de recombinaison des trous.
- J_n : Densité du courant des électrons.
- J_p : Densité du courant des trous.
- e : Charge électrique élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19}\text{C}$).
- D_n : Coefficient de diffusion des électrons.
- D_p : Coefficient de diffusion des trous.
- K : Constante de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23}$ jk⁻¹).
- i : Courant électrique (A).

i_{diff} : Courant de diffusion des porteurs majoritaire (A).

i_{inv} : Courant de saturation en inverse (A).

V_T : Tension thermique.

I_s : Courant de saturation (A).

ϕ_0 : Potentiel interne.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 1	
1.1 Introduction.....	3
1.2 Définition d'un semi-conducteur	3
1.2.1 Bandes d'énergie	4
1.2.2 Équations fondamentales des matériaux et dispositifs semi-conducteurs.....	5
1.3 Jonction p-n	7
1.3.1 Jonction p-n à l'équilibre	8
a Champ électrostatique	10
b Champ électrique	11
c Potentiel électrostatique.....	12
1.3.2 Polarisation en direct	14
1.3.3 Polarisation en inverse	16
1.4 Phénomène de claquage dans une jonction p-n.....	19
1.4.1 Définition du claquage	20
1.4.2 Ionisation par impact.....	20
1.4.3 Claquage par effet Zener (ou effet tunnel)	21
1.4.4 Effet d'avalanche	21
1.4.5 Calcul de la tension de claquage théoriquement.....	22
1.5 Anneau de garde	23
1.5.1 Influence de la tension sur le potentiel et le champ électrique.....	24
1.5.2 Rôle de l'anneau de garde.....	25
1.6 Conclusion	26
2.1 Introduction.....	28
2.2 Présentation du logiciel TCAD-SILVACO	28
2.2.1 ATHENA	29
2.2.2 ATLAS.....	29
2.2.3 DeckBuild.....	30
2.2.4 DEVEDIT	31
2.2.5 Tonyplot.....	31

2.3	Entrés et sorties d'ATLAS.....	31
2.4	Ordre de commande d'ATLAS	32
2.4.1	Spécification de la structure	33
a	Spécification du maillage : MESH	33
b	Spécification des régions : REGION	34
c	Spécification des électrodes : ELECTRODE	36
d	Spécification du dopage : DOPING	36
2.4.2	Spécification des matériaux et des modèles physique	37
a	Spécification du matériau : MATERIAL	37
b	Spécification des modèles : MODELS	37
c	Spécification des contacts	37
d	Spécification d'interface.....	38
2.4.3	Les méthodes numériques	38
a	Gummel	39
b	Newton	39
c	Bloc	39
2.4.4	Spécification des solutions	39
a	Log	39
b	Solve	39
c	Load	40
d	Save	40
2.4.5	Analyse des résultats.....	40
a	Extract.....	41
b	TonyPlot.....	41
2.5	Extraction de la tension de claquage d'une diode avec ATLAS.....	41
2.5.1	Cas d'une diode idéale	41
2.5.2	Cas d'une diode réelle	43
2.5.3	Cas d'une diode p-n avec un anneau de garde	45
2.6	Conclusion	47
3.1	Introduction.....	49
3.2	Optimisation du positionnement des anneaux de garde	49
3.2.1	Optimisation du premier anneau de garde	50
3.2.2	Optimisation du deuxième anneau de garde	52

3.2.3	Optimisation du troisième anneau de garde	54
3.2.4	Optimisation du quatrième anneau de garde	56
3.3	Optimisation de la largeur de l'anneau de garde.....	59
3.3.1	Première méthode d'optimisation de la largeur.....	59
3.3.2	Deuxième méthode d'optimisation de la largeur	61
3.4	Conclusion	63
	Conclusion générale.....	65

Liste des figures

Figure 1.1.	Représentation des bandes de conduction, de valence et du gap de matériau [2].....	4
Figure 1.2	Les différentes régions dans une jonction p-n à l'équilibre.....	7
Figure 1.3	Schéma de principe d'une diode à jonction p-n [6].....	8
Figure 1.4	Jonction p-n à l'équilibre [6].....	9
Figure 1.5	Jonction p-n à l'équilibre thermodynamique. a) charge d'espace, b) champ électrique, c) potentiel électrique. [8].....	10
Figure 1.6	Jonction p-n polarisée en directe. [6].....	16
Figure 1.7	Jonction p-n polarisée en inverse. [6].....	17
Figure 1.8	L'influence de la tension de polarisation sur la tension interne pour une jonction p-n.....	18
Figure 1.9	Champ électrique en équilibre thermodynamique et en polarisation directe d'une jonction p-n.....	18
Figure 1.10	Champ électrique en équilibre thermodynamique et en polarisation inverse d'une jonction p-n.....	19
Figure 1.11	Caractéristique courant-tension en polarisation directe et en polarisation inverse. [12].....	20
Figure 1.12	Bandes d'énergie à la tension de claquage [13].....	22
Figure 1.13	Structure d'une jonction p-n avec un anneau de garde.....	23
Figure 1.14	Variation du potentiel électrique dans la jonction p-n en fonction de la tension de polarisation.....	24
Figure 1.15	Variation du champ électrique dans la jonction p-n en fonction de la tension de polarisation.....	25
Figure 1.16	L'intensité du champ électrique dans la jonction p-n polarisée en inverse sans et avec anneau de grade.....	26
Figure 2.1	L'outil DeckBuild.....	30
Figure 2.2	L'environnement ATLAS.....	31

Figure 2.3	Maillage horizontale et vertical pour une structure d'une jonction p-n.....	34
Figure 2.4	Les différentes régions dans une jonction p-n.....	35
Figure 2.5	Les électrodes dans une jonction p-n.....	36
Figure 2.6	Diode à jonction abrupte p-n.....	42
Figure 2.7	Maillage pour une structure d'une diode p-n idéale avec l'outil ATLAS.....	42
Figure 2.8	Caractéristique courant-tension ($\log(I)$ - V) d'une diode idéale.....	43
Figure 2.9	Structure d'une diode réelle.....	43
Figure 2.10	Maillage horizontal et vertical pour une structure d'une diode réelle avec l'outil ATLAS.....	44
Figure 2.11	Caractéristique courant-tension ($\log(I)$ - V) d'une diode réelle.....	45
Figure 2.12	Structure d'une diode avec un anneau de garde.....	46
Figure 2.13	Structure d'une diode avec un anneau de garde avec l'outil ATLAS.....	46
Figure 2.14	Caractéristiques courant-tension ($\log(I)$ - V) d'une diode avec anneau de garde.....	47
Figure 3.1	Les différentes structures présentant le positionnement du premier anneau de garde simulé avec l'outil ATLAS de SILVACO.....	50
Figure 3.2	Caractéristiques courant-tension ($\log(I)$ - V) relatives aux différentes positions du premier anneau de garde vis-à-vis de la jonction p-n.....	51
Figure 3.3	La tension de claquage en fonction du positionnement du premier anneau de garde.....	52
Figure 3.4	Les différentes structures présentant le positionnement du deuxième anneau de garde simulé avec l'outil ATLAS de SILVACO.....	53
Figure 3.5	Caractéristiques courant-tension ($\log(I)$ - V) relatives aux différentes positions du deuxième anneau de garde vis-à-vis de la jonction p-n.....	53
Figure 3.6	La tension de claquage en fonction du positionnement du deuxième anneau de garde.....	54
Figure 3.7	Les différentes structures présentant le positionnement du troisième anneau de garde simulé avec l'outil ATLAS de SILVACO.....	55

Figure 3.8	Caractéristique courant-tension ($\log(I)$ - V) relatives aux différentes positions du troisième anneau de garde vis-à-vis de la jonction p-n.....	55
Figure 3.9	La tension de claquage en fonction du positionnement du troisième anneau de garde.....	56
Figure 3.10	Les différentes structures présentant le positionnement du quatrième anneau de garde simulées avec l'outil ATLAS de SILVACO.....	57
Figure 3.11	Caractéristique courant-tension ($\log(I)$ - V) relatives aux différentes positions du quatrième anneau de garde vis-à-vis de la jonction p-n.....	57
Figure 3.12	La tension de claquage en fonction du positionnement du quatrième anneau de garde.....	58
Figure 3.13	La tension de claquage en fonction du nombre d'anneau de garde.....	58
Figure 3.14	Les différentes structures présentant la largeur de la première méthode simulées avec l'outil ATLAS de SILVACO.....	60
Figure 3.15	La tension de claquage en fonction de la largeur de la première méthode d'optimisation de la largeur.....	60
Figure 3.16	La tension de claquage en fonction de la largeur de l'anneau de garde extraite par la première méthode	61
Figure 3.17	Les différentes structures présentant la largeur de la deuxième méthode simulées avec l'outil ATLAS de SILVACO.....	62
Figure 3.18	La tension de claquage en fonction de la largeur de la deuxième méthode d'optimisation de la largeur.....	62
Figure 3.19	La tension de claquage en fonction de la largeur de l'anneau de garde extraite par la deuxième méthode.....	63
Figure 3.20	Variation de la tension de claquage en fonction de l'état de la diode	64

Liste des tableaux

Tableau 2.1 L'ordre des groupes des commandes d'ATLAS.....32

Introduction générale

Le domaine des composants semi-conducteurs de puissance connaît aujourd'hui une forte expansion. Ce qui distingue ces composants c'est leur fonction, qui est idéalement celle d'un interrupteur, ainsi que les ordres de grandeur de tension et de courant commutables. Ces composants sont en pleine évolution; leurs caractéristiques deviennent de plus en plus performantes et leurs applications s'étendent de jour en jour: alimentations à découpage, allumage électronique, éclairage des tubes fluorescents au néon, redresseurs, etc.

La technologie PLANAR a permis la réalisation de composant de qualité et a permis une grande densité d'intégration. Mais cette technologie est limitée à cause de l'existence d'un fort champ électrique au niveau des courbures des jonctions. Dans le but d'obtenir une tenue en tension proche de la de tenue en tension de la jonction plane, plusieurs technique ont été développées, parmi ces techniques on citera la technique de l'anneau de garde flottant.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à faire une investigation sur le rôle des anneaux de garde utilisés pour améliorer les performances d'un dispositif semi-conducteur de type diode. Cette investigation va concerner la position des anneaux de garde, leurs nombre ainsi que leurs formes géométriques Cette étude sera basée sur la simulation à l'aide des outils de simulation du logiciel Silvaco-TCAD.

Ce mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Tout d'abord, le premier chapitre présente des notions fondamentales des semi-conducteurs. Le phénomène de claquage de la jonction est présenté à travers un exemple relatif à un dispositif semi-conducteur de type diode polarisé en inverse.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons l'outil de simulation utilisé dans le cadre de ce travail qui est l'outil ATLAS du logiciel Silvaco-TCAD. Un exemple est illustré sur l'utilisation de ce logiciel à travers la présence d'un anneau de garde sur le dispositif semi-conducteur.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des étapes de simulations ainsi que les résultats obtenus pour les différents cas de positionnement des anneaux de garde et les performances électriques extraites pour chaque cas.

Enfin, nous terminons par une conclusion.

Chapitre 1 Notion générale sur le semi-conducteur

1.1 Introduction

Les semi-conducteurs sont des corps solides dont la conductivité électrique se situe entre celle des métaux et celle des isolants. L'utilité des semi-conducteurs est immense dans le domaine électronique à cause de ses propriétés physiques. Pour notre travail nous avons choisis le silicium qui est un matériau semi-conducteur très utile dans la fabrication électronique pour étudier la tension de claquage dans une jonction p-n polarisée en inverse.

Dans ce chapitre nous avons donné les différentes définitions qui concernent le semi-conducteur. Dans notre cadre de travail nous avons utilisé une jonction p-n polarisée en inverse pour laquelle nous avons donné ses propriétés, les équations qui sont nécessaires et la possibilité d'améliorer notre jonction pour définir l'utilité des anneaux de gardes.

1.2 Définition d'un semi-conducteur

On distingue 3 types de matériaux : isolants, conducteurs et semi-conducteurs, ce dernier est intermédiaire entre isolants et conducteurs, il dépend beaucoup de la température. Lorsque la température diminue (à $T=0K$) il se comporte comme un isolant, et dès que la température augmente il se comporte comme un conducteur. La résistivité des semi-conducteurs varie entre $10^{-3} \Omega\text{-cm}$ et $10^9 \Omega\text{-cm}$, alors que celle des métaux est de l'ordre de $10^{-6} \Omega\text{-cm}$ et celle des isolants peut atteindre $10^{22} \Omega\text{-cm}$. [1]

1.2.1 Bandes d'énergie

Dans un corps solide, deux bandes sont particulièrement importantes pour la compréhension des phénomènes de conduction : la bande de conduction et la bande de valence. La bande de conduction représente les énergies des électrons libres. Dans la bande de valence se situent les électrons liés avec le réseau cristallin (figure 1.1). [2]

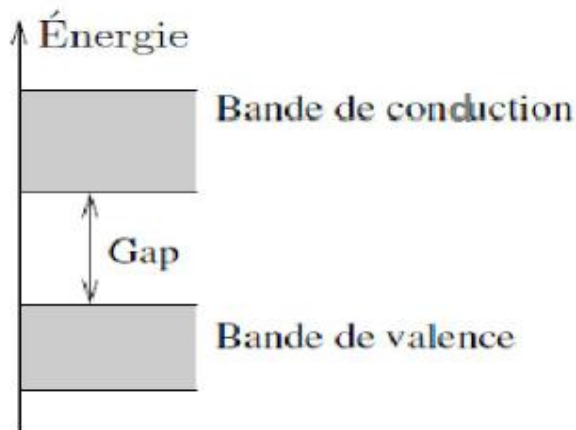


Figure1.1. Représentation des bandes de conduction, de valence et du gap du matériau. [2]

Les bandes sont séparées par une zone énergétique interdite : c'est la plage des énergies que les électrons ne peuvent pas posséder. Cette zone, aussi que sa largeur, s'appelle gap énergétique. C'est un paramètre propre du matériau (on parle d'un gap du matériau). Ainsi, les électrons peuvent passer directement de la bande de valence vers la bande de conduction pour cela il faut qu'ils acquièrent une énergie égale au moins à la largeur du gap. Il y a différents mécanismes par lesquels les électrons peuvent recevoir de l'énergie. Celui le plus courant est un échauffement : plus la température d'un corps est élevée, plus d'énergie possèdent les électrons, plus ils ont de chances de franchir le gap.

1.2.2 Équations fondamentales des matériaux et dispositifs semi-conducteurs

L'équation de Poisson et les équations de continuité pour les électrons et les trous permettent de décrire les potentiels électrostatiques et les phénomènes de transport des charges électriques dans un matériau semi-conducteur. Ainsi, le potentiel électrostatique V est relié à la densité de charge d'espace par l'équation de Poisson :

$$\nabla^2 V = - \frac{\rho}{\epsilon_s} \quad (1-1)$$

Avec: $\rho = p - n + N_d - N_a$

« n » et « p » sont les densités d'électrons et des trous libres, N_a et N_d sont les concentrations de donneurs et d'accepteurs ionisés, ϵ_s est la permittivité diélectrique du semi-conducteur. A une dimension l'équation (1-1) s'écrit comme suit :

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

Pour décrire les phénomènes de transport des porteurs, on utilise les équations de continuité pour les électrons et pour les trous, qui régissent la condition d'équilibre dynamique des porteurs de charge dans le semi-conducteur. Elles donnent la relation entre les courants, les mécanismes de génération et de recombinaison et la distribution spatiale et temporelle des porteurs de charges libres :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \operatorname{div}(j_n) + G_n - R_n \quad (1-3a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{1}{e} \operatorname{div}(j_p) + G_p - R_p \quad (1-3b)$$

R_n (R_p), G_n (G_p) représentent les taux de recombinaison et de génération des électrons (trous) ; J_n (J_p) la densité de courant des électrons (trous) ; e c'est la charge électrique élémentaire.

À une dimension (1-3) s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{e} \frac{\partial J_n}{\partial x} + G_n - R_n \quad (1-4.a)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{e} \frac{\partial J_p}{\partial x} + G_p - R_p \quad (1-4.b)$$

Pour résoudre les équations (1-3), nous avons besoin de connaître les mécanismes de génération, recombinaison et les courants. En ce qui concerne les courants, dans l'approximation dérive-diffusion (drift-diffusion approximation), les courants d'électrons et de trous résultent de la somme de deux termes : un gradient de concentration et un gradient de potentiel électrostatique :

$$J_n = -en \mu_n \nabla V + eD_n \nabla n \quad (1-5.a)$$

$$J_p = -ep \mu_p \nabla V - eD_p \nabla p \quad (1-5.b)$$

Où μ_n (μ_p), D_n (D_p) représentent, respectivement, la mobilité et le coefficient de diffusion des électrons (des trous) reliés par la relation d'Einstein :

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{e} \quad (1-6)$$

k est la constante de Boltzmann.

A une dimension (1-5) s'écrivent comme :

$$J_n = -en \mu_n \frac{dV}{dx} + eD_n \frac{dn}{dx} \quad (1-7a)$$

$$J_p = -ep \mu_p \frac{dV}{dx} - eD_p \frac{dp}{dx} \quad (1-7b)$$

Dans les équations (1-5) et (1-7) les premiers termes sont les courants de dérives et les deuxièmes sont les courants de diffusion, à ces deux termes peuvent s'ajouter d'autres mécanismes de transport comme le courant tunnel.

L'équation de Poisson forme avec les deux équations de continuité un système à trois équations et trois inconnues : le potentiel électrostatique, les densités des électrons et des trous. Ces trois équations sont le point de départ de l'analyse de la plupart des

phénomènes. Elles peuvent être résolues analytiquement dans certains cas particuliers, mais dans la plupart des cas la résolution numérique de ces équations est nécessaire. [3]

1.3 Jonction p-n

En physique des semi-conducteurs, une jonction p-n désigne une zone 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. Alors qu'un semi-conducteur dopé est un bon conducteur, la jonction ne laisse quasiment pas passer le courant. 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. La caractéristique $I(V)$ de la jonction est donc fortement non linéaire: c'est celle d'une diode. [4]

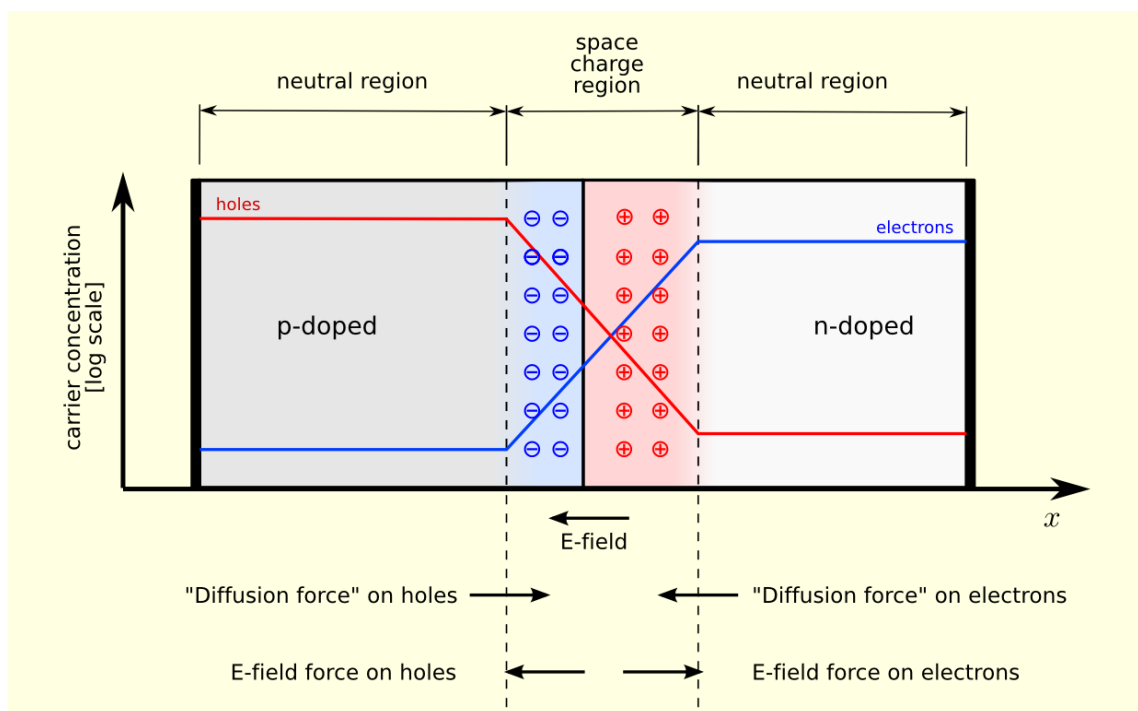


Figure 1.2. Les différentes régions dans une diode à jonction p-n à l'équilibre.

La diode p-n est un composant électronique, elle est constituée de deux pôles non linéaire et polarisé. Le sens de branchement de la diode a donc une importance sur le fonctionnement du circuit électronique [5]. Elle est réalisée par une jonction p-n, Une

diode est créée en accolant un substrat déficitaire en électrons c'est-à-dire riche en trous (semi-conducteur type P) à un substrat riche en électrons libres (semi-conducteur de type N ou métal). La plupart des diodes sont réalisées par la jonction de deux semi-conducteurs: l'un dopé « p » l'autre dopé « n ».

La frontière entre les régions dopées est appelée jonction métallurgique. Des contacts métalliques sont exposés sur le semi-conducteur pour constituer l'anode (contact avec la région p) et la cathode (contact avec la région n). Le schéma de principe de la diode p-n est illustré à la figure 1.3. [6]

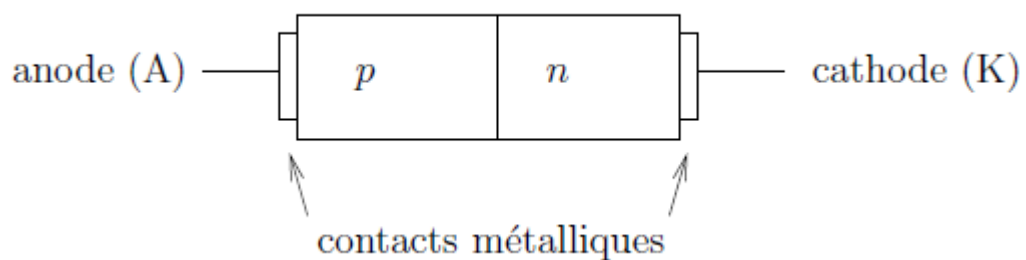


Figure 1.3 : Schéma de principe d'une diode à jonction p-n [6].

1.3.1 Jonction p-n à l'équilibre

Considérons tout d'abord une diode à jonction p-n à l'équilibre : la jonction est maintenue à une température constante (température ambiante) et 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 :

$$i = 0$$

Et

$$V = V_{\text{anode}} - V_{\text{cathode}} = 0 \quad (1-8)$$

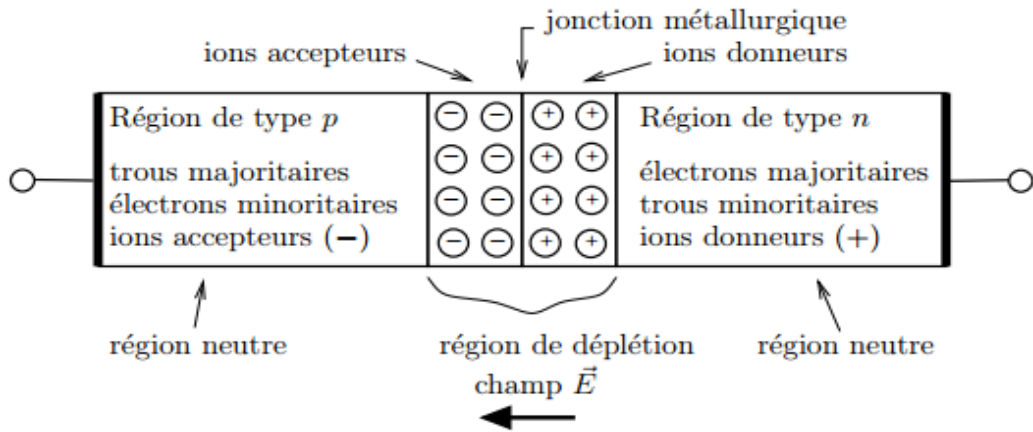


Figure 1.4. Jonction p-n à l'équilibre. [6]

L'équilibre est atteint lorsque le courant de diffusion est contrebalancé par le courant résultant de l'entraînement de porteurs par le champ électrique de la région de déplétion. Notez qu'il s'agit d'un équilibre dynamique : certains porteurs diffusent de part et d'autre tandis que d'autres porteurs sont entraînés en sens inverse par le champ électrique. A l'équilibre, le courant net « i » est nul. Par convention, nous prendrons comme courant positif un courant qui s'écoule de la région « p » à la région « n ». Le courant net i est la somme de deux termes :

$$i = i_{\text{diff}} + i_{\text{inv}} \quad (1-9)$$

Ou

1. i_{diff} est le courant de diffusion des majoritaires à travers la jonction : il correspond à la diffusion des électrons de n vers p et des trous de p vers n. Dans les deux cas, cela donne un courant positif.
2. i_{inv} est le courant de saturation inverse ou courant de fuite. Il est dû au transport des porteurs minoritaires par le champ électrique de la région de déplétion.

$$i|_{v=0} = i_{\text{diff}}|_{v=0} + i_{\text{inv}}|_{v=0} = 0 \quad (1-10)$$

$$\Rightarrow i_{\text{diff}}|_{v=0} = -i_{\text{inv}}|_{v=0} \quad (1-11)$$

$$i_{inv}|_{v=0} = -I_S \quad (1-12)$$

Ce qui donne également

$$i_{diff}|_{v=0} = I_S \quad (1-13)$$

Avec $I_S > 0$.

a *Champ électrostatique*

Lorsque les charges qui créent le champ sont au repos dans le référentiel d'étude, on parle de champ électrostatique. [7]

L'étude de potentiel électrostatique dans la jonction p-n nécessite la résolution de l'équation de Poisson en 1D :

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon} = -\frac{q}{\epsilon} (p-n+N_d^+-N_a^-) \quad (1-14)$$

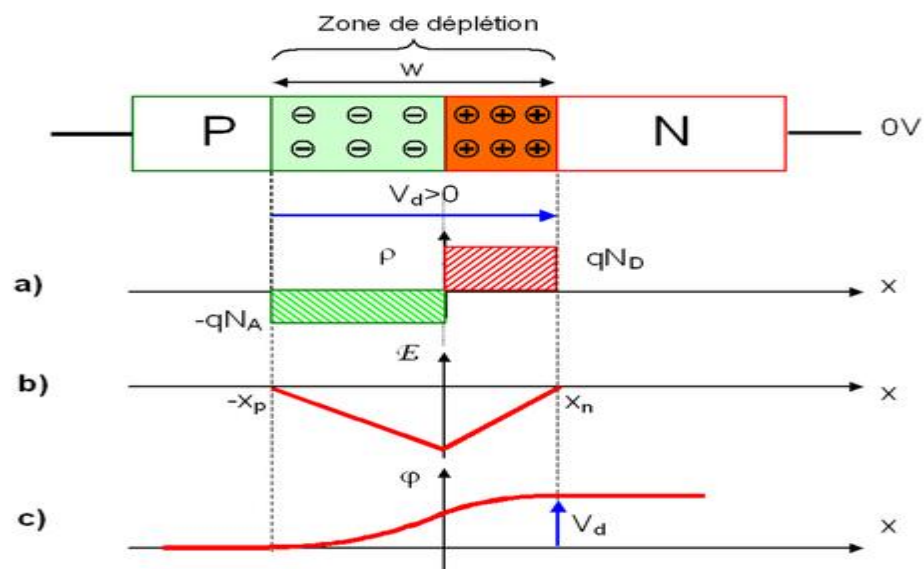


Figure 1.5. Jonction p-n à l'équilibre thermodynamique. a) Charge d'espace, b) Champ électrique, c) Potentiel électrostatique [8].

Pour la zone quasi-neutre

$$\rho(x) = 0 \text{ Pour } \begin{cases} -\infty < x < -x_p \\ x_n < x < +\infty \end{cases}$$

Pour la zone de déplétion

$$\rho(x) = \begin{cases} -qNa & \text{pour } -X_p < X < 0 \\ qNd & \text{pour } 0 < X < X_n \end{cases}$$

***b* Champ électrique**

En physique, un champ électrique est un champ de force invisible créée par l'attraction et la répulsion de charge électrique, un tel champ permet de déterminer en tout point de l'espace la force électrique exercée à distance par ces charges. [9]

Le champ électrique est nul dans la zone quasi-neutre, alors la première intégration s'écrit comme suit:

Zone quasi neutre

$$E(x) = 0 \text{ pour } \begin{cases} -\infty < x < -x_p \\ x_n < x < +\infty \end{cases}$$

Zone de charge d'espace

Pour: $-x_p < x < 0$:

$$\begin{cases} \frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{dE(x)}{dx} = \frac{q}{\epsilon} Na \\ E(-x_p) = 0 \end{cases}$$

$$E(x) = -\frac{qNa}{\epsilon} (x+x_p)$$

Pour $X=0$ le champ $E(x)$ est maximal $E(x) = E_{\max}$

$$E_{\max} = -\frac{qNa}{\epsilon} x_p$$

Pour : $0 < x < x_n$:

$$\begin{cases} \frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{dE(x)}{dx} = -\frac{q}{\epsilon} Nd \\ E(x_n) = 0 \end{cases}$$

$$E(x) = -\frac{qNd}{\epsilon}(x_n - x)$$

Pour $x=0$ le champ $E(x)$ est maximal $E(x) = E_{\max}$

$$E_{\max} = -\frac{qNd}{\epsilon} x_n$$

La continuité du champ électrique en $x=0$ impose que: $E(x=0^-) = E(x=0^+)$ donc :

$$-\frac{qNa}{\epsilon} x_p = -\frac{qNd}{\epsilon} x_n$$

$$N_a x_p = N_d x_n$$

Cette relation représente l'expression de la neutralité électrique du système.

$$|qN_d x_n| = |qN_a x_p|$$

$qN_d x_n$: la charge de déplétion du côté n de la jonction.

$qN_a x_p$: la charge de déplétion du côté p de la jonction.

c Potentiel électrostatique

On suit vers une seconde intégration

Zone quasi neutre

$$\text{Pour: } \begin{cases} -\infty < X < -X_p & V(X) = V_p \\ X_n < X < +\infty & V(X) = V_n \end{cases}$$

Zone de charge d'espace

Pour: $-X_p < X < 0$:

$$-E(x) = \frac{dV}{dx} = \frac{qNa}{\epsilon}(x + x_p)$$

$$V(x) = \frac{qNa}{2\epsilon}(x + x_p)^2 + V_p$$

Pour $0 < x < x_n$:

$$-E(x) = \frac{dV}{dx} = \frac{qNd}{\epsilon}(x_n + x) \quad (1-15)$$

$$V(x) = \frac{qNd}{2\epsilon}(x_n + x)^2 + V_n \quad (1-16)$$

D'où l'énergie potentielle s'écrit :

$$E_p(x) = -qV(x) \quad (1-17)$$

Dans la zone de charge d'espace:

L'expression de la continuité en $X=0$ donne le potentiel de jonction $V(X=0^-) = V(X=0^+)$

$$\frac{qNa}{2\epsilon}(x_p)^2 + V_p = -\frac{qNd}{2\epsilon}(x_n)^2 + V_n$$

$$\phi_0 = V_n - V_p = \frac{qNa}{2\epsilon}(x_p)^2 + V_p + \frac{qNd}{2\epsilon}(x_n)^2 + V_n \quad (1-18)$$

Sachant que la continuité du champ électrique: $N_a X_p = N_d X_n$

$$X_p = \sqrt{\frac{2\epsilon \phi_0 Nd}{qNa(Na+Nd)}}$$

Et

$$X_n = \sqrt{\frac{2\epsilon \phi_0 Na}{qNd(Na+Nd)}}$$

Et la largeur de charge d'espace vaut donc :

$$W = X_p + X_n = \sqrt{\frac{2\epsilon \phi_0 (Na+Nd)}{qNaNd}} \quad (1-19)$$

On a :

$$E_{\max} = - \frac{qNd}{\epsilon} x_n$$

Et

$$E_{\max} = - \frac{qNa}{\epsilon} x_p$$

$$W = \frac{E_{\max}}{q} \left(\frac{1}{Na} + \frac{1}{Nd} \right)$$

$$E_{\max} = \frac{qw}{\epsilon} \frac{NaNd}{Na+Nd} \quad (1-20)$$

1.3.2 Polarisation en direct

L'équilibre entre les courants de diffusion et d'entraînement est rompu lorsqu'une tension non nulle est appliquée entre les électrodes de la diode p-n. La diode est polarisée en direct si l'anode est portée à un potentiel supérieur à celui de la cathode, c'est-à-dire si

$$V = V_{\text{anode}} - V_{\text{cathode}} > 0 \quad (1-21)$$

Dans ce cas, nous allons voir que le déséquilibre des courants favorise la diffusion des porteurs majoritaires et le courant net traversant la diode est positif,

$$i = i_{\text{diff}}(v) + i_{\text{inv}}(v) > 0 \quad (1-22)$$

Pour une différence de potentiel positive entre la région « p » et la région « n », la densité de champ électrique va diminuer, donc un plus grand nombre de porteurs majoritaires peuvent franchir la région de déplétion. [10]

Le courant de diffusion augmente comme une fonction exponentielle, il est donné par la relation suivante:

$$i_{\text{diff}}(v) = i_{\text{diff}}|_{v=0} e^{v/V_T} \quad (1-23)$$

D'après l'équation (1.13) on peut écrire

$$i_{\text{diff}}(v) = I_S e^{v/V_T} \quad (1-24)$$

Le symbole V_T représente la tension thermique, donnée par la relation

$$V_T = \frac{kT}{e} \quad (1-24)$$

Où $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ est la constante de Boltzmann, T : la température et $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ la charge de l'électron, à la température ambiante ($T = 300 \text{ K}$), on a

$$V_T \approx 25.9 \text{ mV} (T = 300 \text{ K}) \quad (1-26)$$

Le courant i_{inv} mesure le nombre de porteurs minoritaires qui parviennent, à chaque seconde, à la région de déplétion pour y être ensuite entraînés par le champ électrique interne. Ce nombre est en réalité indépendant de l'intensité du champ électrique interne ; il dépend avant tout du nombre de porteurs générés thermiquement à chaque seconde au voisinage de la jonction. En effet, si l'on diminue le champ électrique interne sans modifier le taux de génération thermique, les porteurs minoritaires qui parviennent à chaque seconde à la région de déplétion y sont entraînés avec une force plus faible, mais le nombre de ces porteurs entraînés par seconde est inchangé. Dans la jonction p-n, réduire le champ électrique sans modifier le taux de génération thermique n'affecte pas le courant i_{inv} . On en conclut donc que

$$i_{\text{inv}}(v) \approx i_{\text{inv}}|_{v=0} = -I_S \text{ (constante)} \quad (1-27)$$

En regroupant les résultats précédents, les équations. (1.22), (1.24) et (1.27), on obtient un courant i de polarisation directe positif :

$$i = i_{\text{diff}}(v) + i_{\text{inv}}(v) \approx I_S (e^{v/V_T} - 1) > 0 \quad (1-28)$$

Lorsque la tension appliquée dépasse de plusieurs fois la tension thermique, $V \gg V_T$, on a :

$$i \simeq I_S e^{v/V_T} \quad (v \gg V_T). \quad [6] \tag{I-29}$$

La figure 1.6 montre la polarisation en directe :

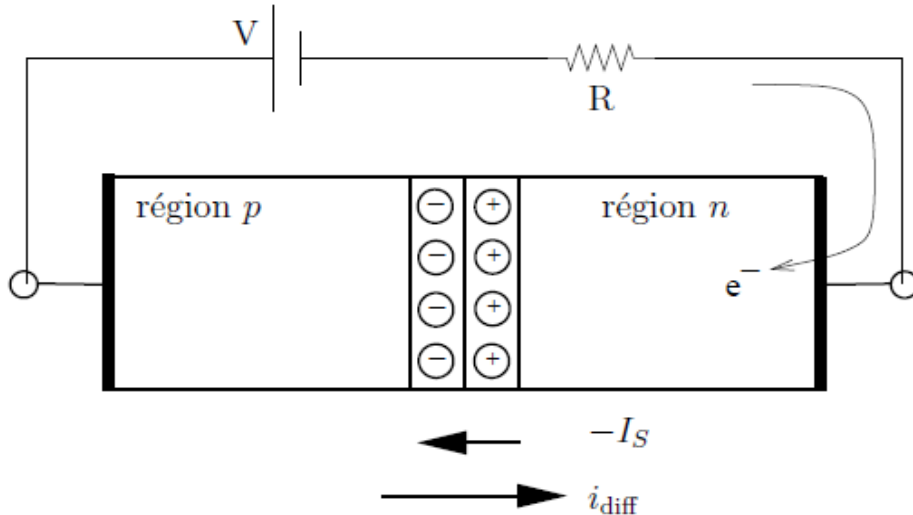


Figure 1.6. Jonction p-n polarisée en direct [6].

1.3.3 Polarisation en inverse

La jonction est polarisée en inverse lorsque l'anode est portée à un potentiel négatif par rapport à celui de la cathode, soit $V = V_{\text{anode}} - V_{\text{cathode}} < 0$. En suivant un raisonnement similaire à celui de la section 1.3.2, nous pouvons faire les observations ci-dessous :

1. La tension appliquée produit un champ électrique qui renforce le champ électrique interne de la région de déplétion.
2. La hauteur de la barrière de potentiel augmente et le courant de diffusion est par conséquent réduit ; un calcul détaillé montre que

$$i_{\text{diff}}(v) = i_{\text{diff}}|_{v=0} e^{v/V_T} = I_S e^{-|v|/V_T} < I_S \tag{I-30}$$

On peut observer que $i_{\text{diff}}(v)$ diminue rapidement avec la valeur absolue $|v|$ de la tension.

3. Le courant total est négatif :

$$i = i_{\text{diff}} - i_{\text{inv}} = I_S (e^{-|v|/V_T} - 1) < 0 \quad (1.31)$$

Pour des tensions inverses supérieures à V_T , c'est-à-dire $|v| \gg V_T$, le courant de diffusion est très faible. Le courant prédominant est alors le courant de saturation :

$$i \approx -I_S \quad (v \ll -V_T) \quad (1.32)$$

4. La largeur de la région de déplétion est plus importante en polarisation inverse qu'à l'équilibre, car il faut découvrir une plus grande charge d'espace pour produire un champ électrique plus intense. Cette situation est illustrée à la figure 1.7. Remarquez à nouveau que le courant des fils de connexion est véhiculé par des électrons. Les électrons qui arrivent dans la région « p » subissent des recombinaisons, qui sont alimentées en trous par le courant de saturation inverse I_S . [6]

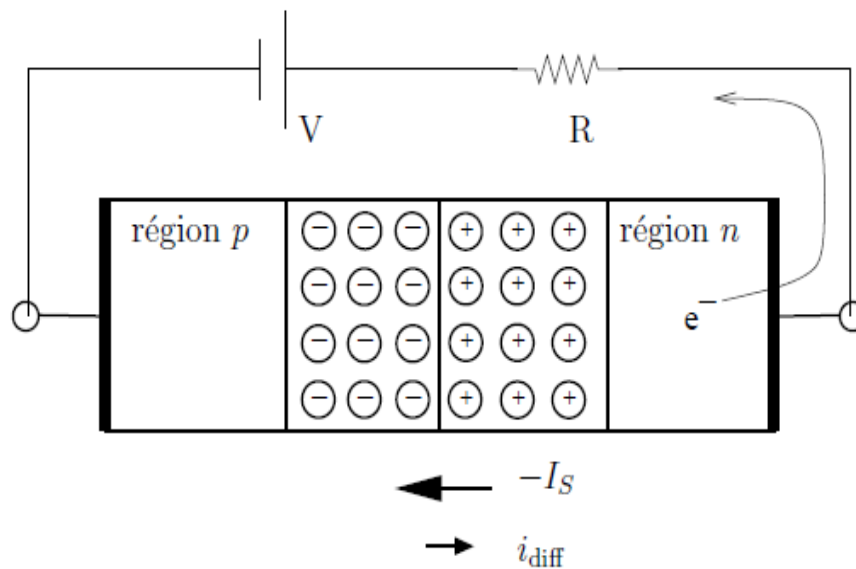


Figure 1.7. Jonction p-n polarisée en inverse [6].

On peut illustrer la comparaison entre une jonction polarisée en inverse, en directe et avec une jonction en équilibre thermodynamique dans les figures suivantes:

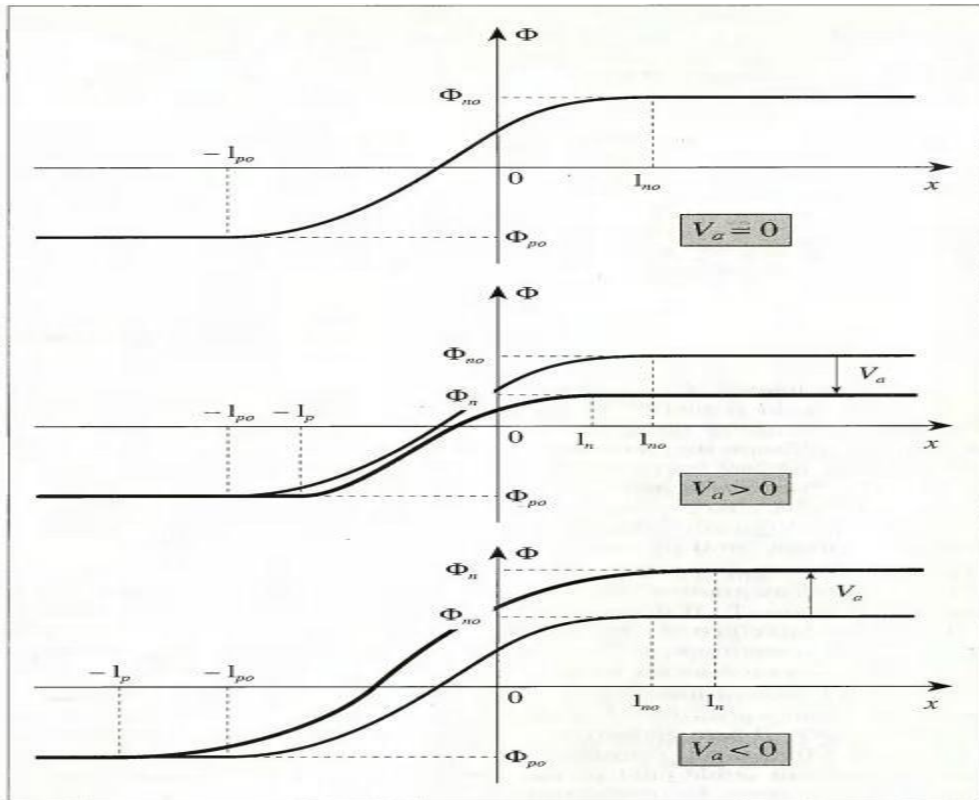


Figure 1.8. L'influence de la tension de polarisation sur la tension interne pour une jonction p-n.

Cette figure représente les 3 graphes qui montrent la tension interne dans une jonction p-n en équilibre thermodynamique, en polarisation directe et en polarisation inverse, on remarque que dans le cas de polarisation inverse la tension interne est plus importante par rapport à la polarisation directe.

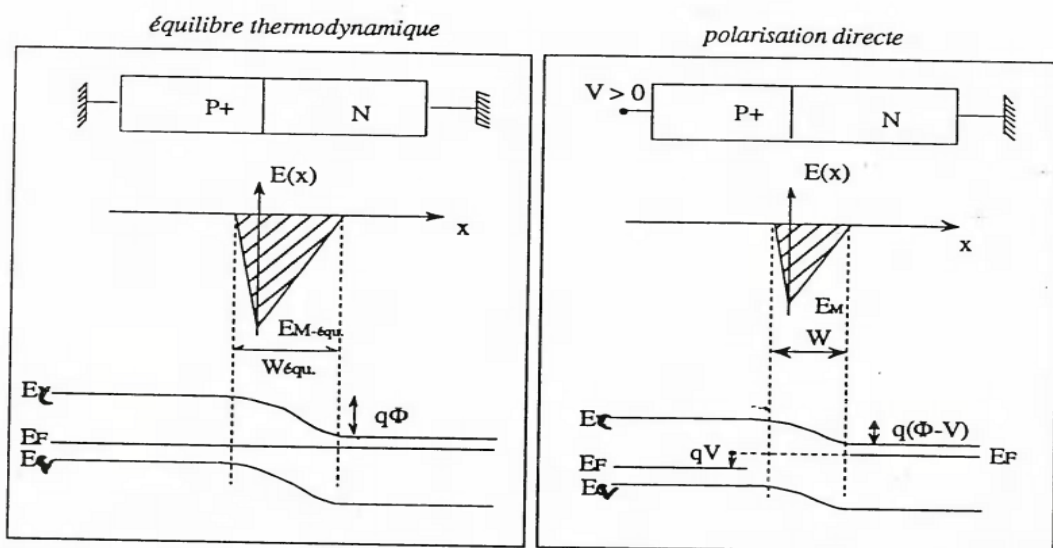


Figure 1.9. Champ électrique en équilibre thermodynamique et en polarisation directe d'une jonction p-n.

Cette figure montre la comparaison dans une jonction p-n entre l'équilibre thermodynamique et la polarisation directe. On remarque que le champ électrique et la tension interne sont plus grands à l'équilibre thermodynamique par rapport à la polarisation directe.

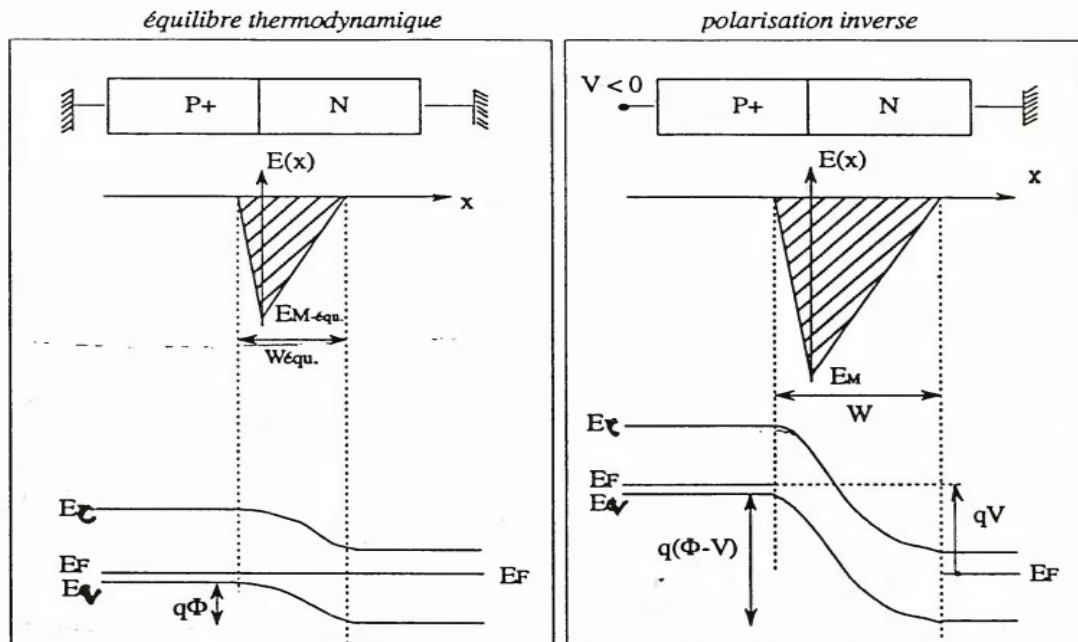


Figure 1.10. Champ électrique en équilibre thermodynamique et en polarisation inverse d'une jonction p-n.

La figure 1.10 montre la comparaison entre le champ électrique et le potentiel interne de la jonction à l'équilibre thermodynamique et en polarisation inverse. On remarque que le champ électrique et le potentiel interne en polarisation inverse sont importants par rapport à ceux en équilibre thermodynamique. Cette augmentation de champ électrique et de tension interne provoquera à un moment donné le claquage de cette jonction.

1.4 Phénomène de claquage dans une jonction p-n

En polarisation continue inverse ($V < 0$), quel que soit la tension faible appliquée aux borne de la jonction le courant total est constant et vaut $-I_S$. Ce courant est fort naturellement appelé courant de saturation. Cependant, pour de forte polarisation inverse le courant total peut brusquement et fortement augmenter, c'est le phénomène de claquage. [11]

1.4.1 Définition du claquage

On atteint la tension de claquage de la jonction p-n, notée V_c si la polarisation est en inverse et le courant par conséquent augment brusquement comme le montre la figure 1.11 :

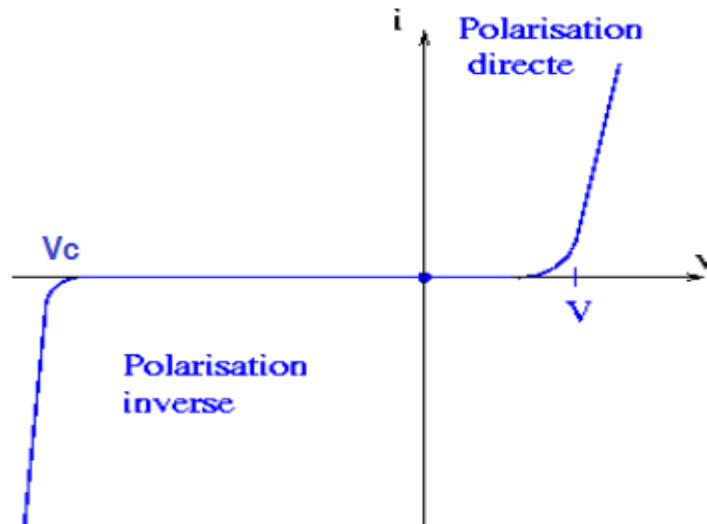


Figure 1.11. Caractéristique courant-tension en polarisation directe et en polarisation inverse [12].

Lorsque l'on augmente la tension de polarisation inverse, on augmente de ce fait le champ électrique à l'intérieur de la jonction. Or, il existe une valeur limite E_0 (pour le silicium $E_0=0.5\text{MV/cm}$) à ce champ électrique. En effet, lorsque le champ électrique augmente, la force électrique $\vec{F} = -q\vec{E}$ qui s'exerce sur les électrons liés au réseau cristallin s'accroît, et devient supérieure à la force de liaison des électrons de valence sur les noyaux. Ces électrons sont ainsi libérés, le cristal devient alors conducteur, et par conséquent le champ électrique n'augmente plus. Ceci signifie que le champ électrique maximum que l'on peut établir dans un cristal semi-conducteur est celui qui provoque l'excitation directe d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction, c'est à dire l'ionisation du matériau. [11]

1.4.2 Ionisation par impact

Dans le semi-conducteur l'ionisation par impact, est le processus par lequel un transporteur de charge énergétique peut perdre de l'énergie par la création d'autres

porteurs de charge. Un électron (ou trou) avec assez d'énergie cinétique peut choquer un électron lié de son état (dans la bande de valence) et de le promouvoir à un état dans la bande de conduction, c'est la création d'une paire électron-trou. Pour que les porteurs puissent avoir suffisamment d'énergie cinétique, le champ électrique appliqué doit être suffisamment grand en substance, exigeant une grande tension, mais pas nécessairement un grand courant. [13]

1.4.3 Claquage par effet Zener (ou effet tunnel)

Le champ électrique élevé ($\sim 10^6$ V/cm pour le silicium) génère des paires électron-trou. Les électrons associés à ces paires sont émis à travers la zone de déplétion, de la bande de valence vers la bande de conduction, sans modification d'énergie, d'où le terme d'effet tunnel. Dans la pratique, cet effet n'est observable que dans les jonctions PN fortement dopées, pour lesquelles la zone de charge d'espace est très étroite $w \sim 500$ Å diminuant ainsi la longueur du « tunnel ». [13]

1.4.4 Effet d'avalanche

Lorsque la largeur de la zone de charge d'espace n'est pas particulièrement faible, $w > 1000$ Å, un phénomène appelé effet d'avalanche entraîne le claquage de la jonction avant l'effet Zener. Pour des champs électriques de l'ordre de 10^5 V/cm, c'est à dire pour une valeur environ dix fois inférieure au seuil d'effet Zener, l'accélération acquise par quelques porteurs, essentiellement d'origine thermique, est suffisante pour permettre de générer des paires électron-trou par choc avec les atomes du cristal. Ces paires électron-trou sont à leur tour accélérées, et peuvent créer d'autres paires. Il en résulte un processus en chaîne rappelant un phénomène d'avalanche. Ce processus est donné par la figure 1.12. [13]

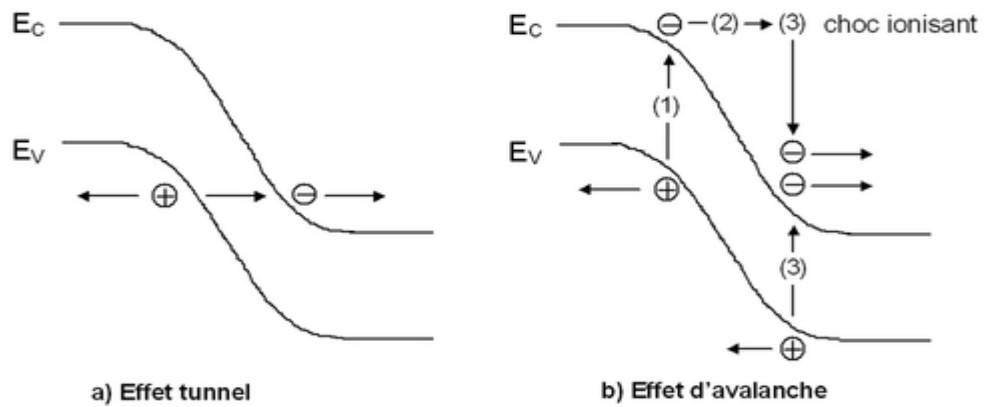


Figure 1.12. Bandes d'énergie à la tension de claquage. [13]

La figure 1.12 représente l'effet tunnel (a) et l'effet d'avalanche (b) on les décrivent comme suit: la phase (1) correspond à la création thermique d'une paire électron-trou, dans la phase (2) l'électron est accéléré par le champ électrique et se trouve de ce fait de plus en plus haut dans la bande de conduction, on dit qu'il devient un porteur chaud; la phase (3) correspond au moment où son énergie cinétique est suffisante pour créer par choc une autre paire électron-trou, à l'issue de ce choc, appelé impact d'ionisation, l'électron ayant perdu de l'énergie se trouve dans le bas de la bande de conduction et une deuxième paire d'électron-trou est créée. Si la largeur de la zone de charge d'espace est suffisante le processus peut se poursuivre. Notons que le phénomène décrit ici pour l'électron existe aussi pour le trou. [13]

1.4.5 Calcul de la tension de claquage théoriquement

La tension de claquage est une des caractéristiques des diodes qui précise la tension inverse maximale qui peut être appliquée à la diode sans provoquer une augmentation exponentielle du courant dans la diode. [14]

Dans notre cadre de travail, il est nécessaire de calculer la tension de claquage théoriquement, d'après les relations (1.19) et (1.20) et pour une jonction p-n polarisée en inverse le potentiel interne ϕ_0 est très petit devant la tension de claquage $V_{br} \gg \phi_0$ donc on aura:

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{qNaNdVbr}{\epsilon(Na+Nd)}} \quad (1.33)$$

La tension de claquage s'écrit donc comme suit:

$$V_{br} = \frac{E^2 \max \epsilon}{2q N d}$$

Et d'après cette relation on peut calculer la tension de claquage pour des valeurs qu'on a utilisées dans notre cadre de travail et qui sont comme suit:

$$E_{\max} = 0.5 \text{ MV/cm} ; N_d = 10^{+18} \text{ cm}^{-3} ; q = 1.6 \cdot 10^{-19} ; \epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} ; \epsilon_r = 11.7$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

$V_{br} = 182,8\text{v}$

1.5 Anneau de garde

La structure de l'anneau de garde flottant a été largement utilisée dans la technologie, c'est un moyen efficace de terminaison de bord de plane. C'est une méthode attrayante de terminaison de bord, car elle est habituellement formée en même temps avec la jonction principale ou le contact d'anode, ce qui économise les étapes coûteuses de traitement. [15,16]

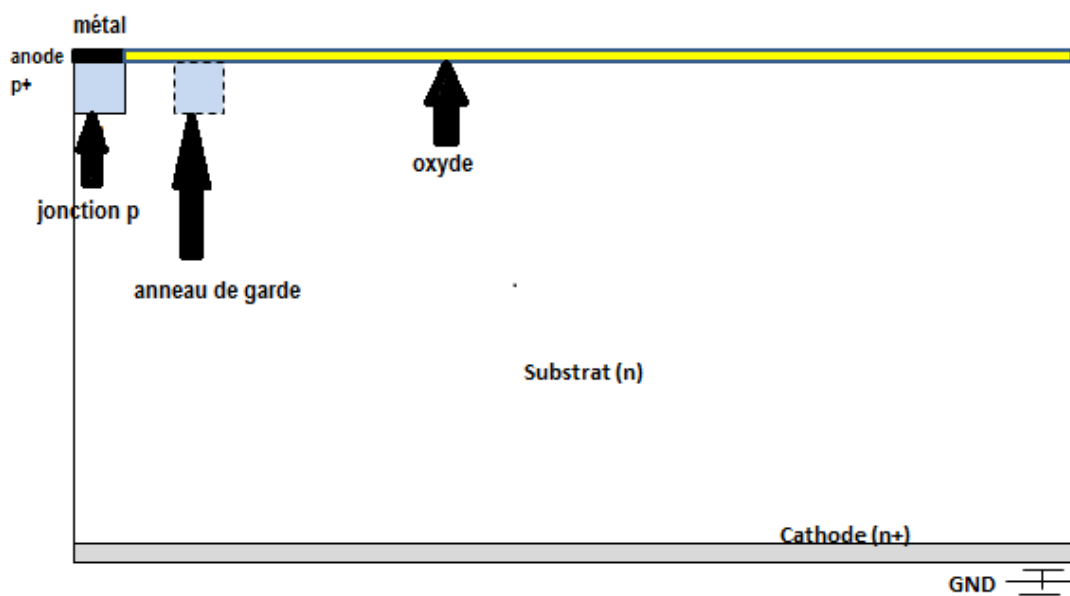


Figure 1.13. Structure d'une jonction p-n avec un anneau de garde.

1.5.1 Influence de la tension sur le potentiel et le champ électrique

Lorsque la tension de polarisation en inverse augmente progressivement aux bornes de la jonction, le potentiel interne ainsi que le champ électrique augmentent et deviennent intense au bord de la jonction p-n comme le montre les figures 1.14 et 1.15:

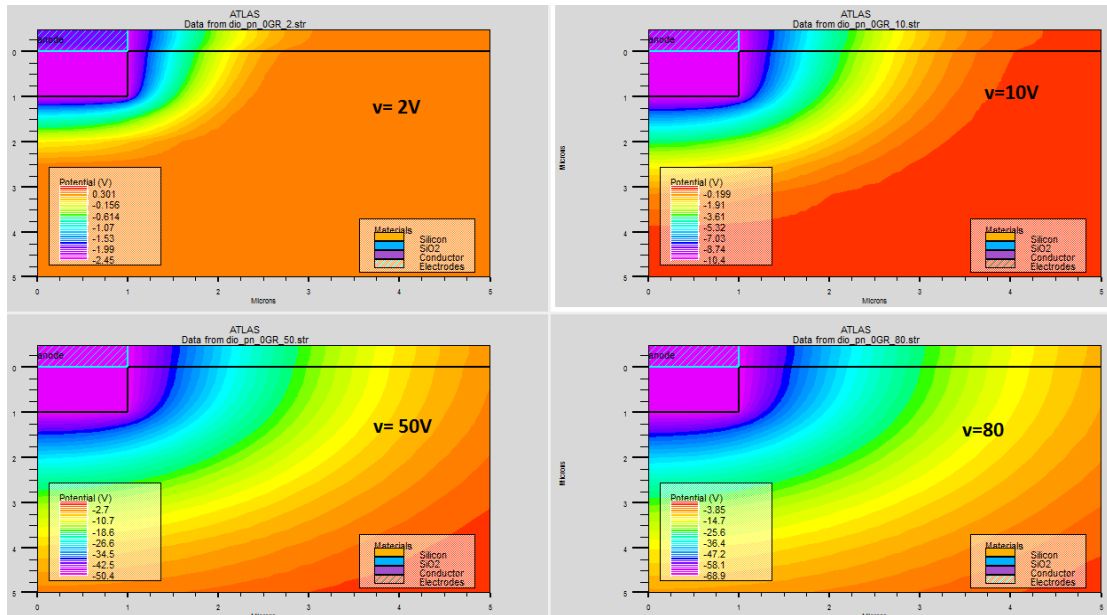


Figure 1.14. Variation du potentiel électrique dans la jonction p-n en fonction de la tension de polarisation.

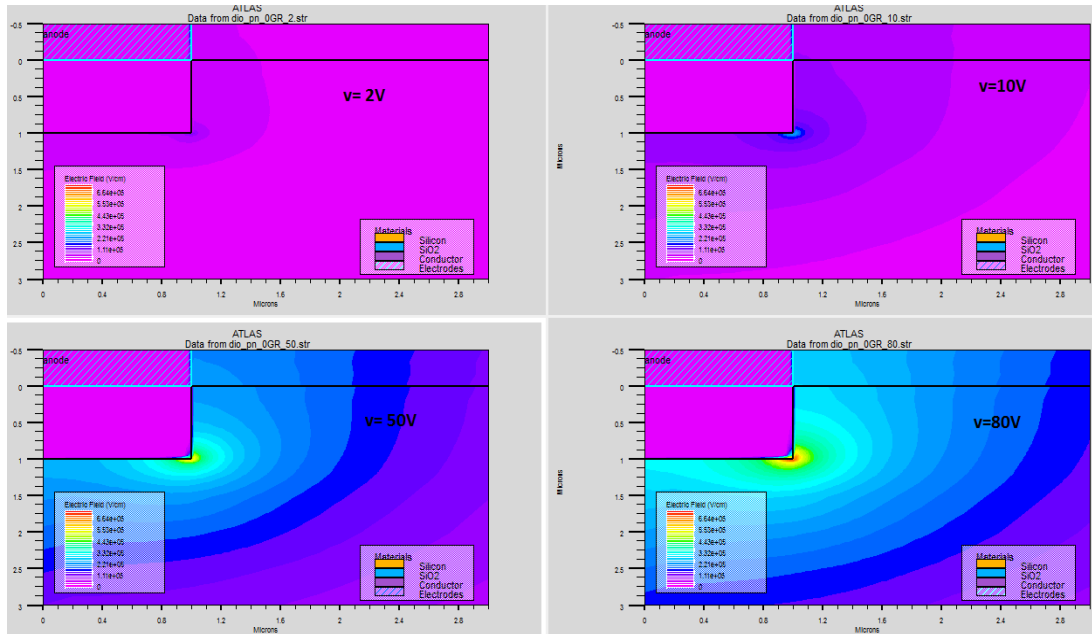


Figure 1.15. Variation du champ électrique dans la jonction p-n en fonction de la tension de polarisation.

Si l'augmentation du champ électrique atteint une valeur critique provoque un claquage au niveau de la jonction.

1.5.2 Rôle de l'anneau de garde

La structure de l'anneau de garde sert à réduire le champ électrique d'éviction à la jonction principale par l'étalement de la couche d'appauvrissement. Le champ électrique se situe en surface au bord de la jonction polarisée en inverse. Lorsque la tension croit, la charge d'espace de la jonction p-n s'étend au même temps que le champ maximal augmente, comme le montre la figure 1.16. Le claquage a lieu lorsque le champ électrique atteint une valeur critique E_{crit} [17]

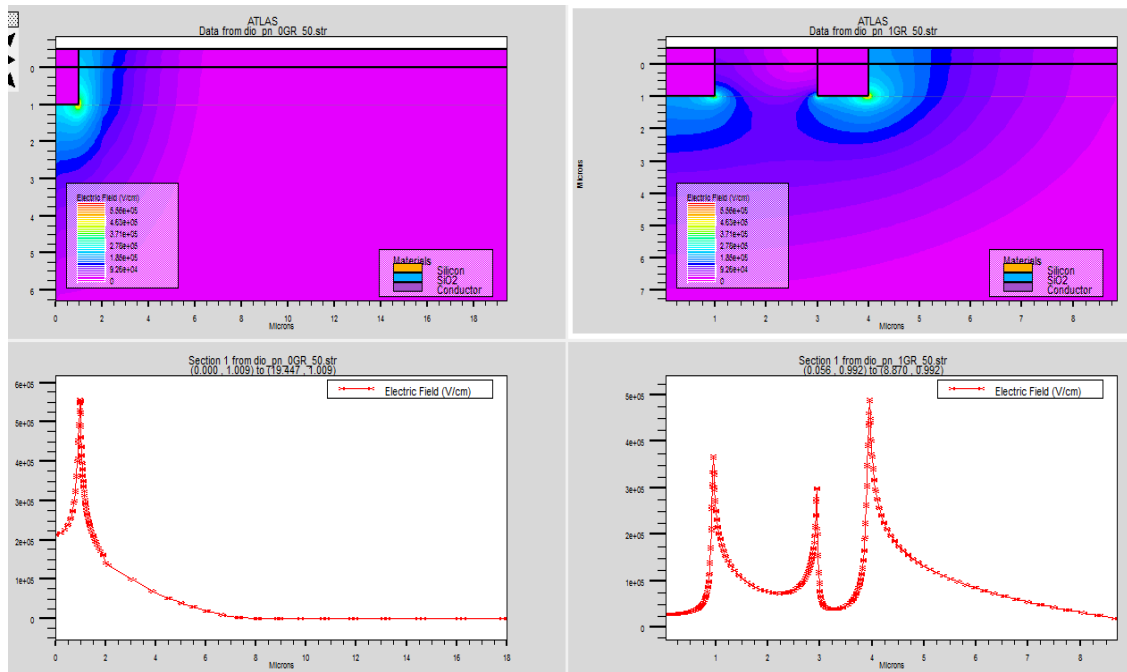


Figure 1.16. L'intensité du champ électrique dans la jonction p-n polarisée en inverse sans et avec anneau de garde.

La figure 1.16 montre la différence entre une jonction p-n polarisée en inverse sans et avec anneau de garde, les graphes sont obtenus par une coupe transversale au niveau de la jonction p-n. On remarque d'abord que le champ électrique est intense au bord de la jonction « p », cette intensité provoque le claquage, par contre la jonction avec un anneau de garde les lignes de champs s'étalent progressivement loin de la région « p » vers l'anneau de garde, par conséquent l'intensité du champ électrique diminue et on aura une intensité moins élevée. Pour la valeur de champ électrique pour une jonction p-n polarisée en inverse sans anneau de garde $E=5.5 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$, et pour le même bord mais avec anneau de garde $E=1.4 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$ et au bord de l'anneau $E=1.5 \cdot 10^5 \text{ V/cm}$ pour une jonction avec un anneau, d'après ces résultats le rôle de l'anneau de garde sert à étaler la charge d'espace de la jonction principale pour répartir le potentiel sur le plus grande surface possible de silicium afin de diminuer le champs électrique et réduire l'intensité de ce dernier et par conséquent d'augmenter la tension de claquage dans cette jonction.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné les notions et les équations fondamentales de semi-conducteur qui concernent notre étude, dans lequel on a défini la jonction p-n et les différents phénomènes qui se passent dans cette jonction en équilibre

thermodynamique, polarisation directe et polarisation inverse, puis on a calculé la tension de claquage théoriquement pour la comparer avec celles qu'on va les obtenir par la suite dans les chapitres 2 et 3. Dans le chapitre suivant on va représenter le logiciel de simulation qu'on a utilisé dans notre cadre d'étude.

Chapitre 2 Présentation de l'outil de simulation

ATLAS de SILVACO

2.1 Introduction

On peut observer les différents comportements physiques et électriques, avec une possibilité d'intégration et une production à faible coût d'un composant électronique à semi-conducteur, par l'utilisation des technologies de la microélectronique. Les simulateurs TCAD (Technology Computer-Aided Design) ont pour but d'économiser le temps et le coût de développement, et ainsi de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs. Ils sont très utiles dans le développement de beaucoup de projets de recherches. Ce logiciel inclut des modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, des techniques de maillage, et l'utilisation des solutions linéaires, etc, afin d'obtenir des résultats très proches de celles de la pratique.

Les simulateurs existants sur le marché (ISE, SYNOPSIS, SILVACO, etc...) ont le même principe de fonctionnement. Dans ce travail, nous avons utilisés le simulateur TCAD-SILVACO.

Dans ce chapitre, nous présenterons le logiciel de simulation SILVACO (Silicon Valley Corporation) et son principe de fonctionnement. On a utilisé, dans notre travail de recherche le module de simulation ATLAS pour la simulation du comportement électrique des composants.

2.2 Présentation du logiciel TCAD-SILVACO

Le logiciel TCAD-SILVACO à comme avantage pour ce type de simulation de donner la possibilité de visualiser les phénomènes physiques qui ne sont pas facilement

observables. Les plus importants modules de logiciel SILVACO sont présentés comme suit :

2.2.1 ATHENA

Le logiciel de simulation ATHENA de TCAD-SILVACO permet de fournir des possibilités générales pour simuler les processus qui sont utilisés dans l'industrie de semi-conducteur en 1 dimension et 2 dimensions de toute les étapes du traitement tel que : diffusion, oxydation, implantation ionique, gravure, procédés de dépôt. Permet de faire aussi des simulations rapides et précises de toutes les étapes de fabrication utilisées dans la technologie CMOS, bipolaire, optoélectronique, et les composants de puissances. Des informations importantes sont fournies par ce logiciel pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques comme les concentrations des porteurs, les profondeurs de jonction, etc...

2.2.2 ATLAS

ATLAS est un outil de simulation est spécialement conçu pour la modélisation en 2 dimensions et 3 dimensions de toutes les technologies modernes des composants électronique. Il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants de semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel.

En plus du comportement électrique externe, il permet aussi de fournir des informations sur la distribution interne des variables : concentrations des porteurs, le champ électrique ou le potentiel, les lignes de courant, etc. et les données importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques. Ceci est réalisé après la résolution numérique des équations de poisson et les équations de continuité des électrons et des trous à deux dimensions en un nombre fini de points formant le maillage de la structure définie par l'utilisateur ou par un autre programme.

Ce simulateur est composé de deux parties :

- Une partie traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation...).
- Une partie formée des modèles physiques des composants semi-conducteurs les plus récents : modèles de recombinaisons, d'ionisation par impact, de mobilités, en température et statiques de Fermi-Dirac et de Boltzmann notamment.

ATLAS est un simulateur qui travaille en conjonction avec d'autres outils interactifs, qui sont DeckBuild, TonyPlot et DevEdit. [1]

2.2.3 DeckBuild

Est un outil d'environnement d'exécution où se trouve le programme de simulation défini, à partir des commandes spécifiques. Il peut être utilisé avec des multiples simulateurs qui sont considérés comme des entrées : ATHENA , ATLAS, etc...

Les résultats de simulation sont affichés tels que les paramètres technologiques (profondeur de jonction, concentration des porteurs) ainsi les paramètres électriques (tension de seuil, courant, etc...) s'effectuent à l'aide d'une fenêtre d'information (Output window).

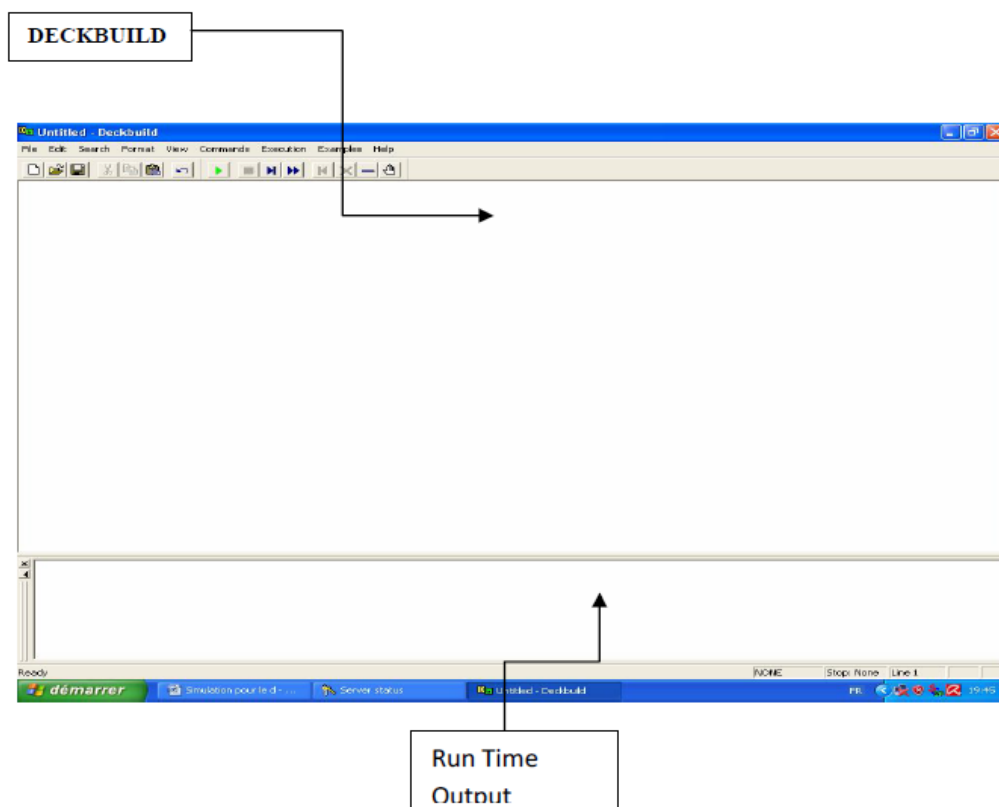


Figure 2.1. L'outil DeckBuild.

Et au-dessus de la fenêtre de DeckBuild se trouve une autre fenêtre Run Time Output qui affiche les erreurs de programmation et les avertissements après la compilation

2.2.4 DEVEDIT

Est l'environnement où sont dessinés les structures (dimension, dopage, ..) et leurs maillages.

2.2.5 Tonyplot

C'est un environnement où sont tracés les résultats de simulation, il permet de donner des possibilités complètes afin de visualiser et analyser des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil de dopage, et caractéristiques électriques). Il peut donner des caractéristiques de sortie en une, deux ou trois dimensions.

2.3 Entrées et sorties d'ATLAS

Dans notre étude on a utilisé le module de simulation ATLAS qui a été conçu d'une façon pour pouvoir l'utiliser avec d'autres outils qui facilitent ou complètent son utilisation comme le montre la figure 2.2

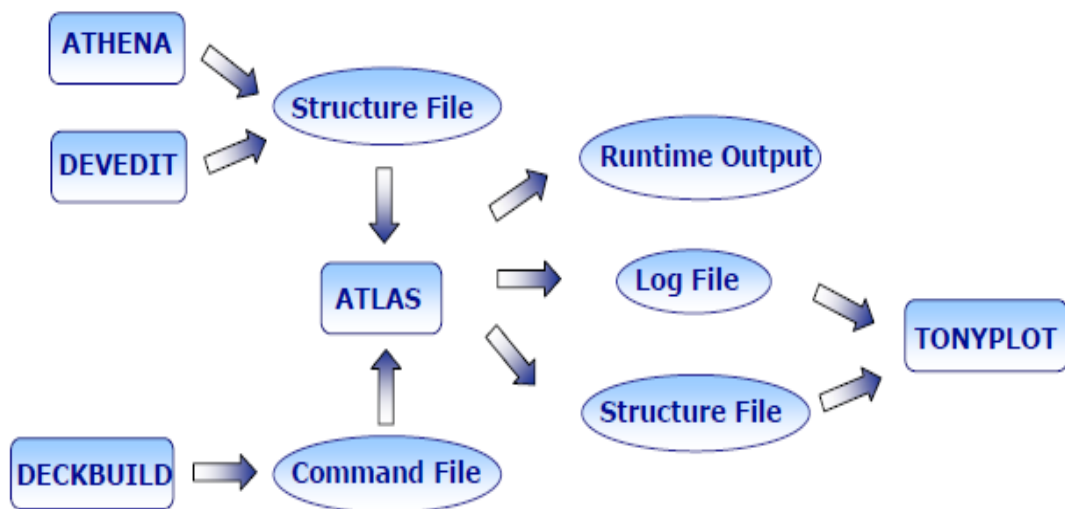


Figure 2.2. L'environnement ATLAS.

Les différents types d'information sont représentés sur la figure 2.2, les simulations réalisées sous ATLAS utilisent deux fichiers d'entrées :

On a comme entré deux fichiers :

-Afin qu'ATLAS s'exécute il va utiliser le premier fichier qui est un texte contenant les commandes (représenté par « Command File »).

- Pour le deuxième fichier, c'est un fichier de structure « Structure File » où se trouve la structure de dispositif. Ce dernier va être simulé dans DEVEDIT.

A la sortie on a trois types de fichiers :

-Premier fichier c'est le fichier de sortie « Run time Output » qui nous donne la progression, les erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation.

-Le deuxième fichier est le fichier « Log File » qui est un fichier de comportement électronique qui a pour but de stocker toutes les valeurs de tension et des courants à partir de l'analyse de dispositif simulé.

-Le troisième fichier de sortie c'est le fichier physique où se trouvent les solutions « Solution Files ». En un point donné, du dispositif, ce fichier stocke les données en 2D ou 3D concernant des valeurs des variables.

Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation « Tony Plot ».

2.4 Ordre de commande d'ATLAS

L'ordre de commande dans ATLAS est très important, il y a 5 groupes d'instructions qui doivent apparaître dans un ordre correct comme le montre la figure 2.3

Groupe	Groupe
1. Spécification de la structure	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Spécification des modèles des matériaux	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Spécification de la méthode	METHOD
4. Spécification des solutions	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Analyse des résultats	EXTRACT TONYPLOT

Tableau 2.1: L'ordre des groupes des commandes d'ATLAS.

2.4.1 Spécification de la structure

a Spécification du maillage : MESH

L'instruction qui permet de spécifier le maillage est défini comme suit :

```
MESH SPACE.MULT=<VALUE>
```

Cette instruction MESH sert à définir les lignes verticales (axe y) et horizontales (axe x) espacées les uns des autres. Le maillage qui se fait dans notre étude est bidimensionnel (2D) donc on définit seulement les paramètres de x et y.

SPACE.MULT c'est un facteur de multiplication entre deux lignes de maillage définies par l'instruction spacing dans une direction donnée pour augmenter ou pour diminuer le nombre de lignes de maillage. [17]

L'instruction qui définit le maillage s'écrit comme suit :

```
X.MESH LOCATION=<VALUE> SPACING=<VALUE>
```

x.mesh définit le maillage dans la direction x, par exemple :

```
x.mesh loc=0.00 spac=0.05
```

```
x.mesh loc=0.8 spac=0.02
```

Loc définit l'intervalle de maillage (dans ce cas entre $x=0 \mu\text{m}$ et $x=1 \mu\text{m}$)

Spac définit la résolution du maillage, Dans notre cas, le maillage aura une

résolution de $0.05\mu\text{m}$ à partir de $x=0$ et terminera par une résolution de $0.01\mu\text{m}$ à $x=1$.

```
Y.MESH LOCATION=<VALUE> SPACING=< VALUE>
```

Y.mesh définit le maillage dans la direction Y.

On peut rapprocher les lignes de maillage afin d'observer le changement qui apparait entre deux régions de dopage différente. Comme on peut les faire éloigner lorsqu'il n'y a pas de variation de dopage afin de gagner du temps lors de la simulation.

La figure 2.3 montre le maillage horizontal et vertical d'une diode p-n polarisée en inverse.

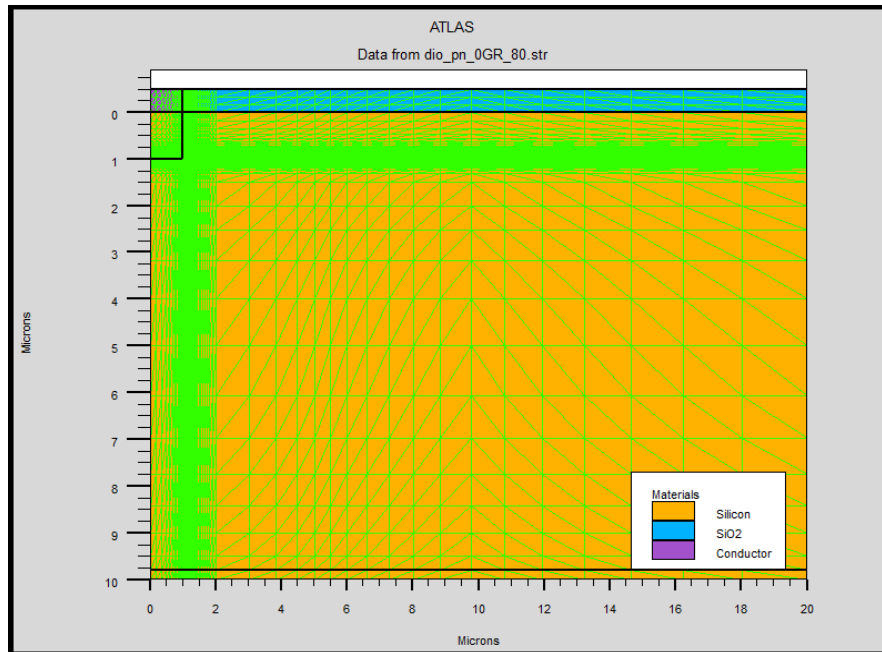


Figure 2.3. Maillage horizontal et vertical pour une structure d'une jonction p-n.

Silvaco-Atlas reçoit les fichiers d'entrée à travers DeckBuild. Le code écrit dans le fichier d'entrée appel « Atlas » pour fonctionner avec la commande suivante:

« go atlas »

Dans ATLAS une instruction prend la forme générale suivante :

<Instruction> <paramètre> = < valeur>

Il y a 04 types pour les valeurs (réel, entier, logique, caractère)

L'ordre des paramètres n'est pas obligatoire, l'abréviation est possible mais exige le non chevauchement avec d'autres instruction, pour écrire un commentaire, on utilise le symbole # qui n'est pas exécuté par le compilateur. ATLAS peut lire 256 caractères dans une ligne, mais il vaut mieux séparer les lignes par un antislash \ à la fin de la ligne dans une longue instruction, pour qu'on puisse lire les instructions d'une manière claire. ATLAS ne fait pas la différence entre une lettre majuscule et une lettre minuscule. [17]

b ***Spécification des régions : REGION***

L'instruction qui permet de spécifier la région d'une structure est défini comme suit :

REGION number=<integer> <material_type> <position parameters>

Juste après la définition de maillage, les régions doivent être définies par l'instruction suivante :

Cette instruction déclare le numéro de la région, le nom de la région, le type de matériau et la position de matériau à travers les paramètres x et y.

On peut avoir 200 régions différentes dans ATLAS. [4]

On peut définir 4 régions par exemple comme suit :

```
#===silicon
```

```
region num=1 silicon
```

```
#===oxide
```

```
region num=2 oxide x.min=0.0 x.max=20 y.min=-0.5 y.max=0
```

```
#===anode
```

```
region num=3 silicon x.min=0.0 x.max=1.0 y.min=0.0 y.max=$'anode_depth'
```

```
#===cathode
```

```
region num=4 silicon x.min=0.0 x.max=20.0 y.min=9.8 y.max=10
```

La figure 2.4 montre les différentes régions à partir de ces commandes utilisées

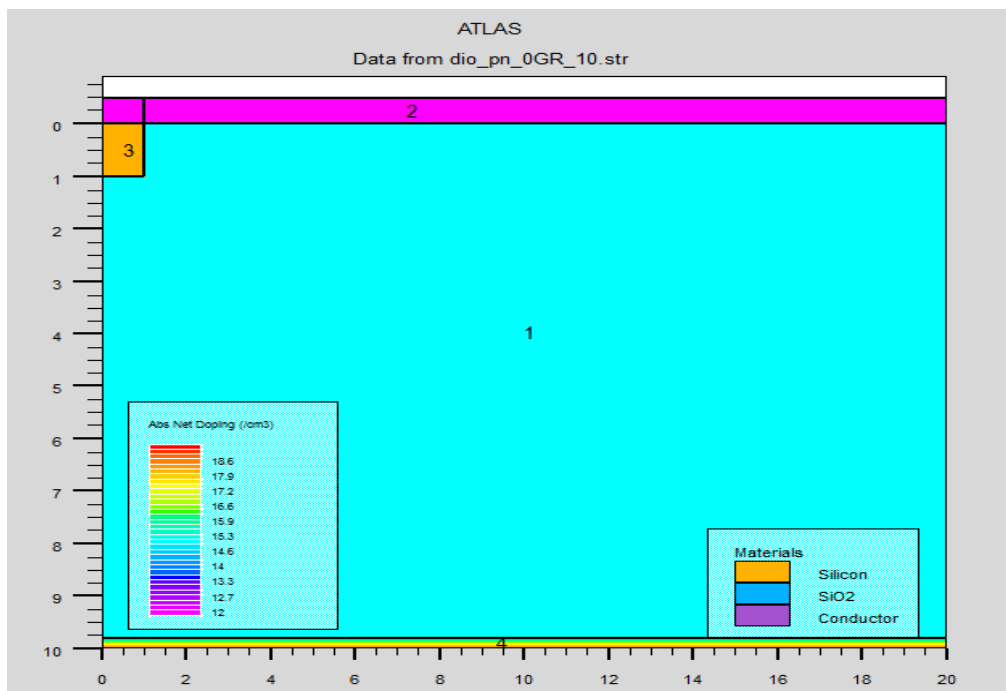


Figure 2.4. Les différentes régions dans une jonction p-n.

c Spécification des électrodes : ELECTRODE

L'instruction qui permet de définir les électrodes de la structure est la suivante :

ELECTRODE NAME=<electrode name> <position_parameters>

Cette instruction annonce le nom de l'électrode et sa position. On peut spécifier jusqu'à 50 électrodes et plus, les positions des électrodes sont localisées par les instructions suivantes :

X.MIN : Spécifie le point de départ de l'électrode.

RIGHT : la position de l'électrode se situe à la droite de la structure (inverse :*LEFT*).

TOP : la position de l'électrode est en haut de la structure (inverse : *BOTTOM*). [17]

Dans notre étude on a que 2 électrodes anode et cathode on les définis par les instructions suivantes :

electrode name=anode x.min=0 x.max=1 y.min=-0.5 y.max=0.0

electrode name=cathode bottom

La figure 2.5 montre les deux électrodes :

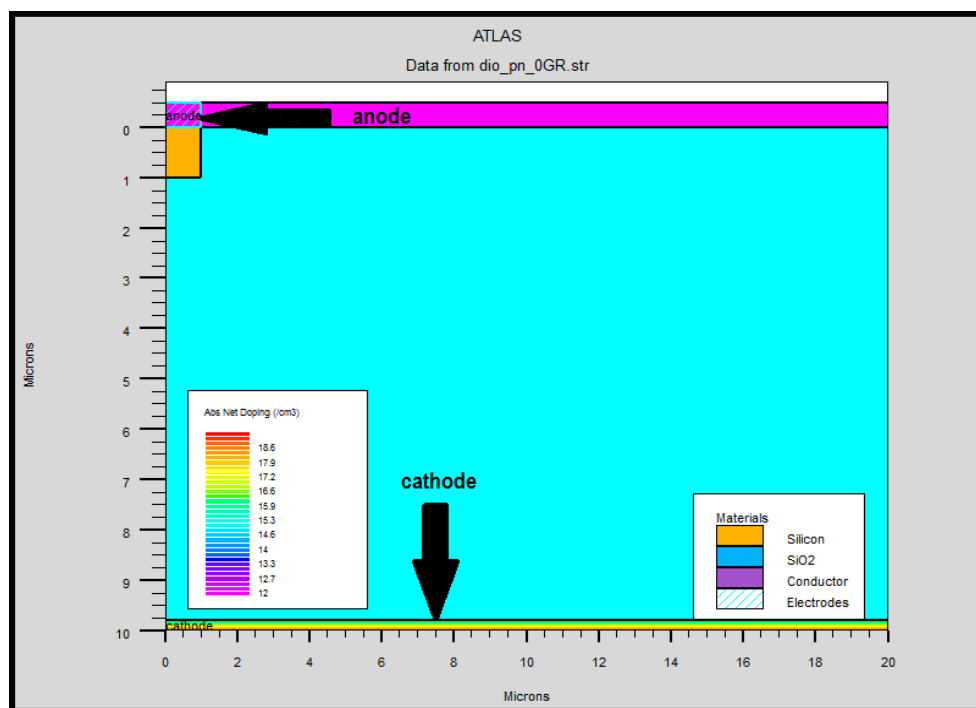


Figure 2.5 .Les électrodes dans une jonction p-n.

d Spécification du dopage : DOPING

Le dopage est défini par l'instruction suivante :

DOPING <distribution_type> <dopant_type> <position_parameters>

Cette instruction permet de déclarer la distribution de dopage qu'on a choisie. Dans notre étude on a choisi la distribution uniforme, le type de dopant et la position de dopage, comme par exemple :

```
doping uniform p.type conc=$dop_top x.l=0 x.r=1 y.t=0.0 y.b=1.0
```

```
doping uniform n.type conc=$dop_back x.l=0 x.r=1 y.t=9.5 y.b=10
```

2.4.2 Spécification des matériaux et des modèles physiques

Après la spécification du maillage et de dopage on passe à l'étape prochaine qui est la spécification des modèles des matériaux. Cette action est accomplie par les instructions suivantes : CONTACT, MATERIAL et MODELS.

a Spécification du matériau : MATERIAL

L'instruction MATERIAL permet d'associer les paramètres physiques aux matériaux utilisés dans la simulation. Tous les matériaux sont classés selon leurs propriétés physiques (énergie du gap, vitesse de sursaturation, etc...). Dans notre étude nous avons utilisé un seul matériau qui est le silicium.

b Spécification des modèles : MODELS

Les modèles physiques sont déclarés par deux instructions MODELS et IMPACT. Ces instructions permettent de faire appel aux modèles physiques existants dans le logiciel. Parmi ces modèles nous citerons à titre d'exemple : les modèles de recombinaisons, les modèles de mobilités, etc.... Le choix de modèle dépend des matériaux choisis dans la simulation. Comme notre étude est faite pour un modèle bipolaire donc on a choisi le modèle « Impact Selber ». Ce modèle est recommandé pour la plupart des cas et permet d'inclure un paramètre qui dépend de la température. Il est utilisé en général pour la polarisation inverse.

c Spécification des contacts

Cette instruction indique les attributs physiques d'une électrode : anode, cathode, drain, etc. Elle est définie comme suit : CONTACT NUMBER=<n> |NAME=<ename>

Exemple : contact name=GR1 resistance=1e+20

On peut distinguer le nom, le numéro de contact et la résistance qui a été attribuée à ce contact.

d Spécification d'interface

Permet d'indiquer les paramètres d'interface aux frontières de semi-conducteur ou un isolant (la vitesse de recombinaison en surface, la densité de charge à l'interface).

Dans notre étude on n'a pas utilisé plusieurs matériaux donc au niveau de la surface on n'a pas des variations de recombinaison et de densité de charge, donc cette instruction n'est pas utile dans notre étude

Après toutes ces spécifications nous avons une commande « Out Put » qui s'écrit comme suit :

```
output j.electron j.hole j.conduc j.total e.field ex.field ey.field flowlines \  
e.mobility h.mobility e.temp h.temp qss charge recomb
```

Cette commande sert à afficher différentes informations comme par exemple : le courant d'électrons des trous, le champ électrique, la mobilité d'électron et des trous etc...

2.4.3 Les méthodes numériques

Après la spécification complète de la structure (géométrie et physique), ATLAS commence à résoudre une série d'équations (équations de continuité, équation de poisson, équations de diffusion) pour calculer les densités des porteurs, les potentiels et les courants.

Pour calculer des solutions aux problèmes de dispositif à semi-conducteur, il existe plusieurs méthodes numériques. On distingue 3 types de solutions qui sont utilisés dans ATLAS :

- Découplée (Gummel).
- Entièrement coupler (Newton).
- Bloc.

a Gummel

La méthode Gummel résout pour chaque inconnu en gardant tous les autres inconnus constants. Le processus est répété jusqu'à ce qu'il y ait une solution stable. Le procédé Gummel est utilisé pour un système d'équations qui est faiblement couplé et lorsqu'il y a convergence linéaire.

b Newton

La méthode de Newton résout toutes les inconnues simultanément. Le procédé NEWTON est utilisé lorsque les équations sont fortement couplées avec convergence quadratique.

c Bloc

La méthode BLOC résout quelques équations avec la méthode Gummel et les autres avec la méthode NEWTON.

2.4.4 Spécification des solutions

Cette étape permet de spécifier la solution après avoir terminé la sélection de la méthode numérique. Cette spécification est composée par ces commandes : LOG, SOLVE, LOAD, et SAVE.

a Log

Cette déclaration permet d'enregistrer toutes les caractéristiques terminales dans un fichier comme le montre l'instruction suivante : `log outfile='$filename'.log`

Cet exemple montre l'enregistrement des données dans un fichier `$'filename'.log`.

b Solve

Cette commande suit l'instruction LOG. SOLVE qui permet d'effectuer une solution pour un ou plusieurs points de polarisation comme le montre le format suivant:

```
solve vstep=-5 vfinal=-160 name=anode compl=-5e-12 cname=anode
```

On distingue la position, le pas de résolution, la tension finale, le type d'arrêt de simulation et le nom.

On a deux types pour arrêter la simulation :

Le premier type est donné par l'instruction suivante :

```
solve vanode=-0.5 vstep=-0.5 vfinal=-2 name=anode
```

Cette instruction nous montre un départ, le pas et la fin.

Le deuxième type est donné par l'instruction suivante :

```
solve vstep=-5 vfinal=-160 name=anode compl=-5e-12 cname=anode
```

Cette instruction a pour but de forcer l'arrêt pour une valeur de courant bien précise.

Dans notre étude on observe le claquage dans une diode p-n polarisée en inverse, sachant que le courant en inverse est très faible et lorsqu'il arrive à une tension bien précise il va avoir un claquage et augmentation brusque de courant pour une même tension. On choisit une valeur de courant ou on peut observer la tension de claquage, toute on gardant la même valeur de courant et on varie que les valeurs de tension. Pour cela on choisit le deuxième type.

c Load

Cette commande charge les solutions précédentes à partir de fichier pour l'utiliser comme estimation à d'autres points de polarisation. L'instruction LOAD est :

```
load inf='$filename'_2.str master
```

d Save

La commande SAVE permet de sauvegarder toutes les informations qui correspondent à un état électrique bien précis, d'un point de nœud de maillage, dans un fichier de sortie. Ce dernier est de type structure. L'instruction est donnée comme suit :

```
save outf='$filename'_10.str
```

2.4.5 Analyse des résultats

Les résultats peuvent être affichés graphiquement à partir de l'instruction « TonyPlot » et les paramètres de dispositifs peuvent être extraits à partir de l'instruction « Extract ».

a Extract

L'instruction qui permet d'extraire des paramètres comme par exemple dans notre cas une tension de claquage avec des paramètres bien définis s'écrit comme suit :

```
extract init infile="'$filename'.log"  
extract name="V_BD" x.val from curve(v."anode",abs(i."anode")) \  
where y.val=5e-12 datafile="dio_pn_1GR_pos_VBD"
```

Cette instruction permet d'extraire une tension de claquage à partir de la courbe, dans la tension se trouve sur l'axe des « x » et le courant dans l'axe des « y ». Précisons la valeur de « y » nous allons avoir la valeur de « x »

b TonyPlot

Cette commande sert à afficher les résultats sous forme d'un graphe. L'instruction qui permet de faire ça s'écrit comme suit :

```
tonyplot '$filename'.log
```

2.5 Extraction de la tension de claquage d'une diode avec ATLAS

Pour illustrer le fonctionnement de l'outil ATLAS dans notre cadre de travail nous allons donner trois exemples de composant électronique ou l'objectif principal est d'observer les caractéristiques courant-tensions d'une diode idéale, une diode à jonction abrupte p-n et une diode avec un anneau de garde par simulation. La polarisation dans les trois exemples est en inverse.

2.5.1 Cas d'une diode idéale

En premier exemple nous allons simuler les caractéristiques courant-tension d'une diode idéale. La géométrie du composant étudié est donnée par la figure 2.6

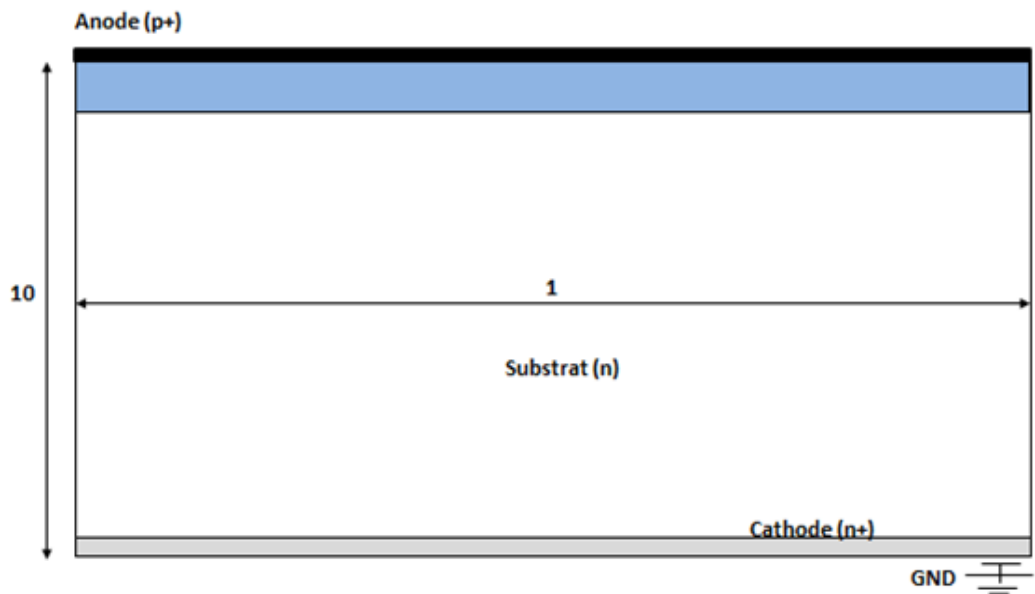


Figure 2.6. Diode a jonction abrupte p-n.

- n-silicon** ($N_d=5.e+15$; Thickness: $20\mu\text{m}$) : substrate
- P+ silicon** ($N_a=1.e+18$; $x_j=1\mu\text{m}$) : anode
- n+ silicon** ($N_d=1.e+19$; $x_j=0.5\mu\text{m}$) : cathode

La structure d'une jonction p-n parfaite sous l'outil ATLAS est présentée sur la figure 2.7. La figure 2.8 présente la variation de courant en fonction de la tension pour une diode a jonction p-n polarisée en inverse.

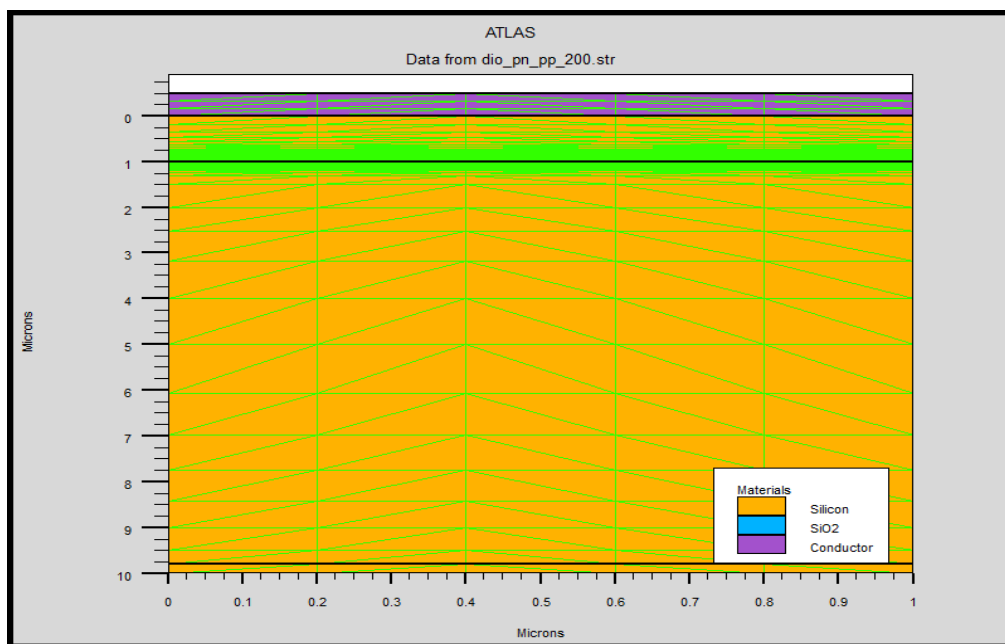


Figure 2.7. Maillage pour une structure d'une diode p-n idéale avec l'outil ATLAS.

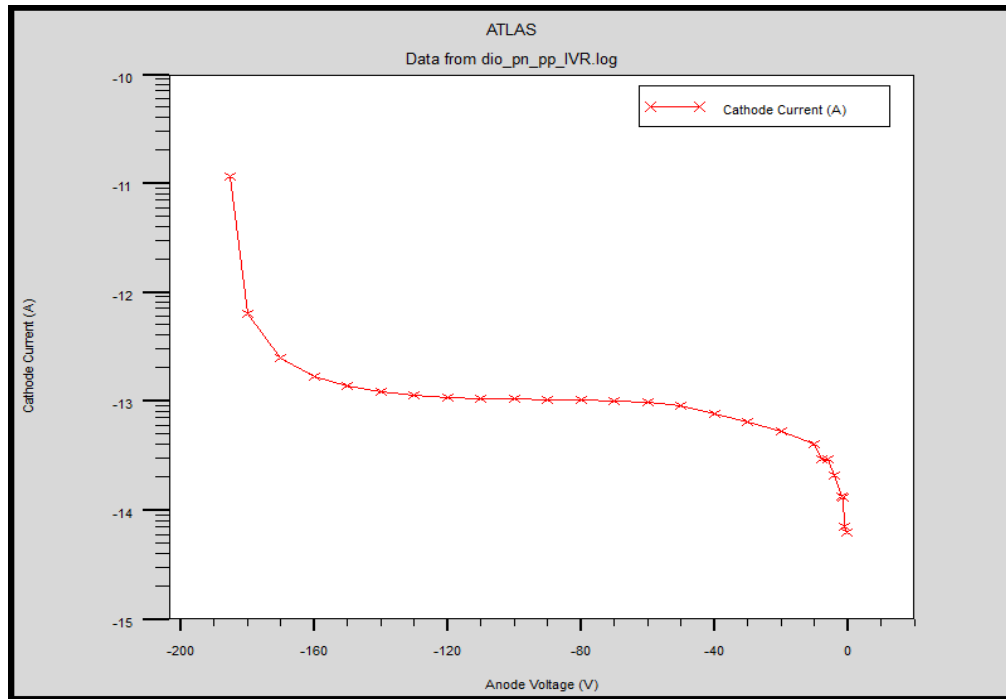


Figure 2.8. Caractéristique courant-tension (log(I)-V) d'une diode idéale.

La figure montre le graphe qui représente la variation de courant(A) en fonction de tension(V) en polarisation inverse et en échelle logarithmique. On remarque que le courant augmente légèrement avec l'augmentation de la tension jusqu'à arriver à une tension du claquage, pour $I=5.e-12A$ la tension de claquage est 170V.

2.5.2 Cas d'une diode réelle

Le cas d'une diode réelle se présente sur la figure 2.9:

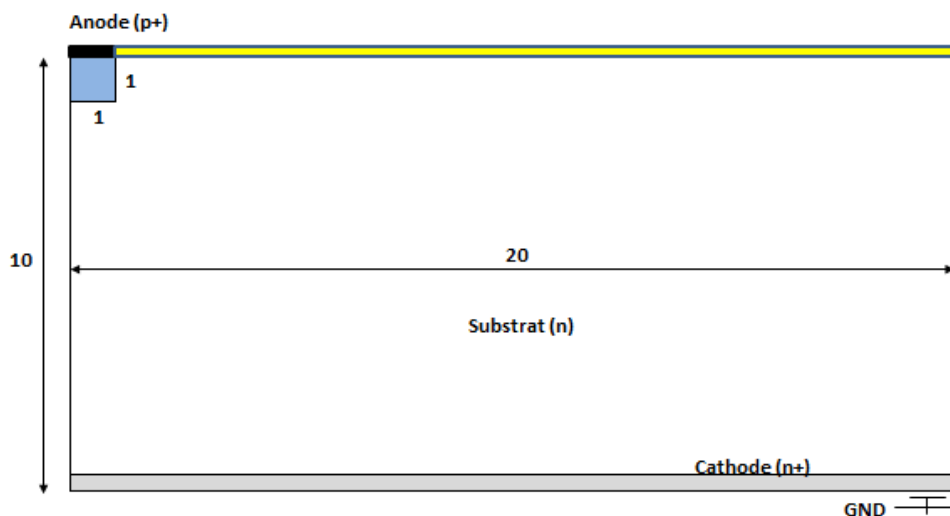


Figure 2.9. Structure d'une Diode réelle.

- n-silicon** ($N_d=5.e+15$; Thickness: $20\mu\text{m}$) : substrate
- P+ silicon** ($N_a=1.e+18$; $x_j=1\mu\text{m}$) : anode
- n+ silicon** ($N_d=1.e+19$; $x_j=0.5\mu\text{m}$) : cathode
- oxyde**
- metal**

Les résultats de simulation par l'outil ATLAS sont représentés dans les figures 2.10 et 2.11

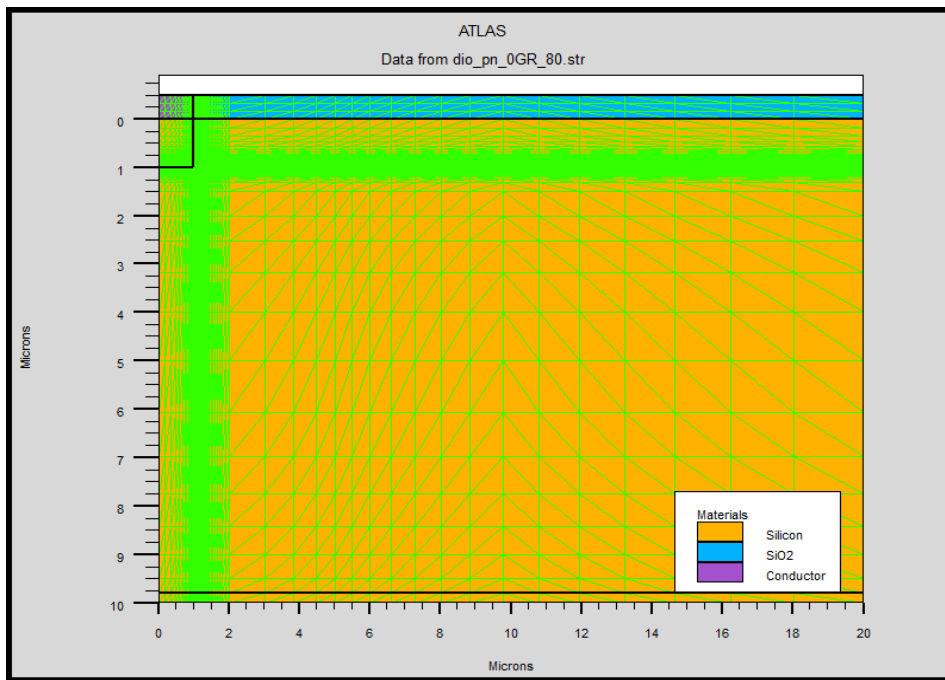


Figure 2.10. Maillage horizontale et verticale pour une Structure d'une diode réelle avec l'outil ATLAS.

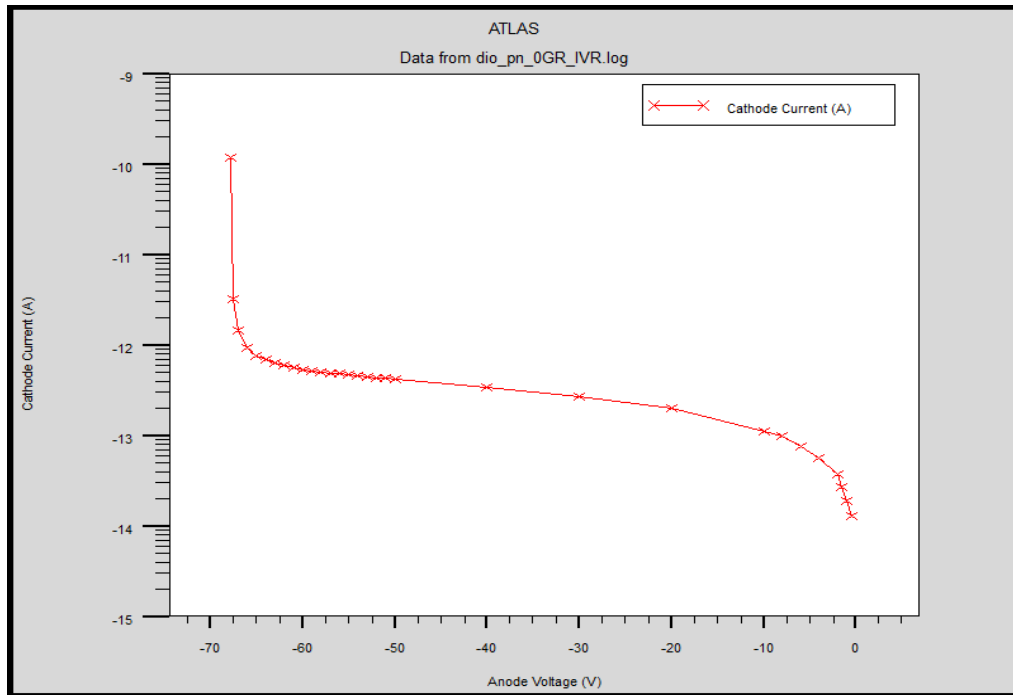


Figure 2.11. Caractéristique courant-tension ($\log(I)$ -V) d'une diode réelle.

La figure 2.11 représente le graphe de variation de courant(A) en fonction de tension(V) dans une diode réelle polarisée en inverse. Le courant augmente avec l'augmentation de la tension jusqu'à arriver à une tension $V=68$. Pour cette tension nous avons une augmentation brusque du courant pour une même valeur de tension. Donc cette tension est la tension de claquage pour cette diode. Nous avons comparé la tension de claquage d'une diode idéale et d'une diode réelle on remarque que la tension de claquage pour la diode idéale est plus élevée que celle d'une diode réelle. Pour s'approcher du cas idéal on va ajouter un anneau de garde pour que le champ électrique s'éloigne le plus possible de la jonction afin d'obtenir une tension de claquage plus grande.

2.5.3 Cas d'une diode p-n avec un anneau de garde

Pour s'approcher de la théorie et du premier exemple, nous avons utilisé un anneau de garde. La structure de ce cas se présente dans la figure 2.12

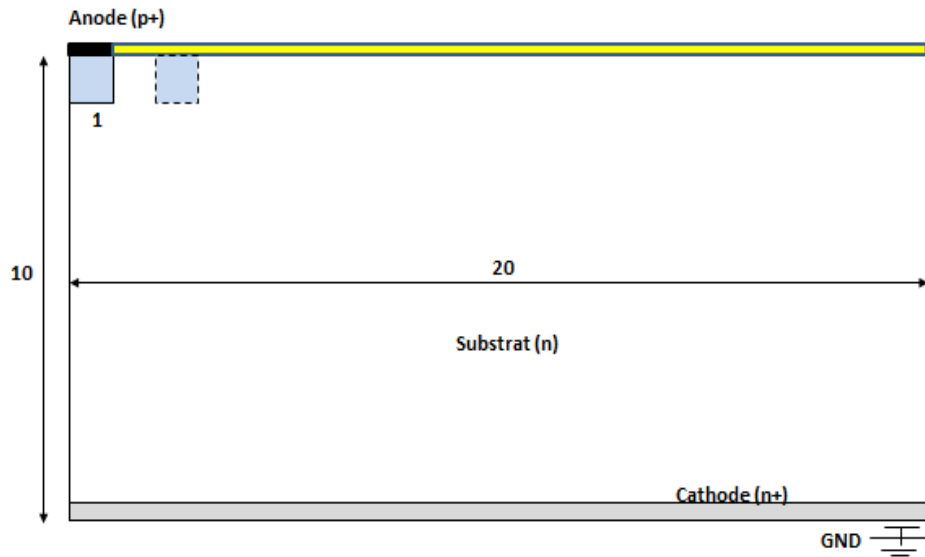
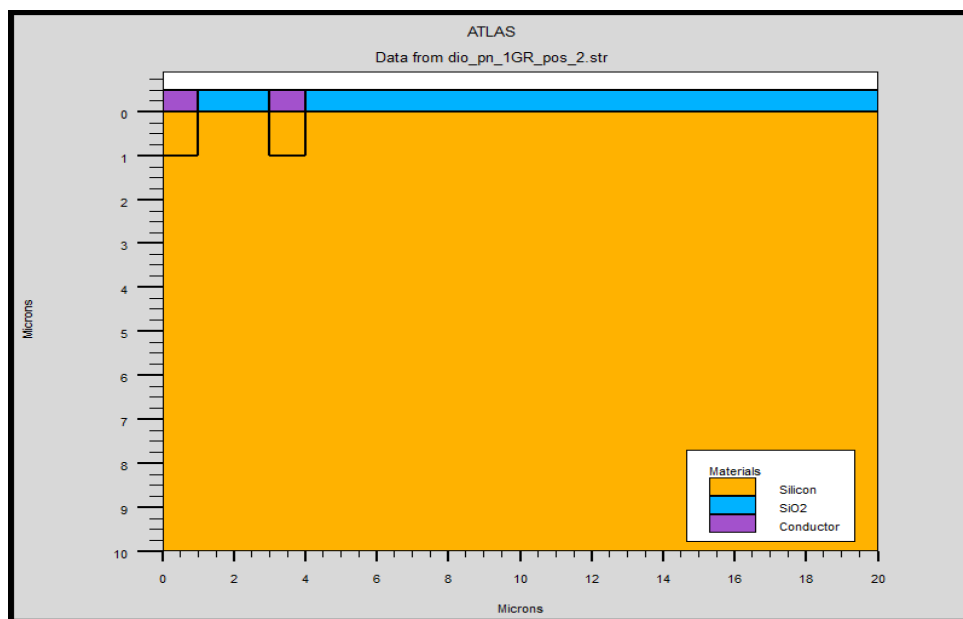


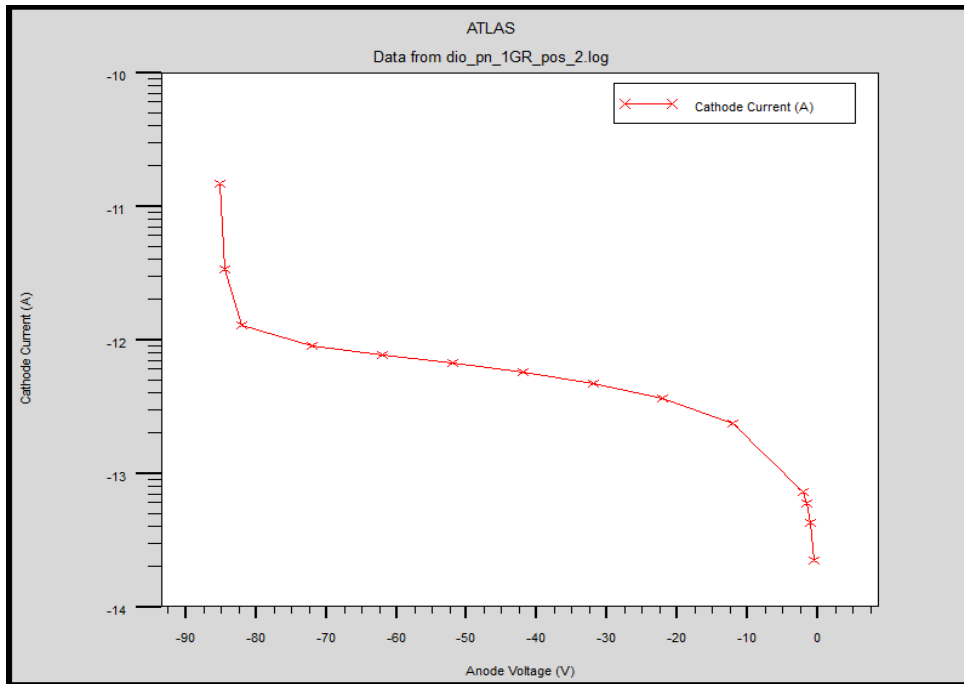
Figure 2.12. Structure d'une diode avec un anneau de garde.

- n-silicon** ($N_d=5.e+15$; Thickness: $20\mu\text{m}$) : substrate
- P+ silicon** ($N_a=1.e+18$; $x_j=1\mu\text{m}$) : anode
- n+ silicon** ($N_d=1.e+19$; $x_j=0.5\mu\text{m}$) : cathode
- oxyde**
- metal**

Les résultats de simulation sont représentés dans les figures 2.13 et 2.14



Figures 2.13. Structure d'une diode avec un anneau de garde avec l'outil ATLAS.



Figures 2.14. Caractéristique courant-tension (log(I)-V) d'une diode avec un anneau de garde.

La figure 2.14 présente le graphe de variation de courant en fonction de la tension en échelle logarithmique d'une diode avec un anneau de garde polarisé en inverse. L'augmentation du courant est synchronisée avec l'augmentation de la tension jusqu'à atteindre une tension de claquage pour $V=85\text{v}$.

On remarque que d'après les trois exemples que nous avons pris, la tension de claquage la plus élevée c'était dans le cas idéal. Par contre lorsque nous avons pris un cas réel, la tension de claquage n'était pas suffisante, donc on a essayé de se rapprocher de la structure idéale pour cela nous avons ajouté un anneau de garde

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le logiciel qu'on a utilisé, qui est SILVACO. Il est conçu de plusieurs modules de simulation. Chaque module de simulation à sa propre propriété qui la diffère d'une autre, et on a précisé et détaillé notre étude sur le simulateur ATLAS que nous avons choisi pour ce travail.

On premier lieu nous avons donné la définition générale de chaque module de simulation de SILVACO. Pour les étapes et les procédures qu'on a utilisées pour l'obtention de la structure d'une jonction p-n, le dopage utilisé, les dimensions prises,

et par la suite nous avons donné trois exemples de simulation qui résument les cas possibles. Pour apercevoir la différence entre ces cas et afin d'arriver à notre objectif qui est de chercher à obtenir une tension de claquage plus élevée en polarisation inverse d'une diode à jonction p-n, basée sur des résultats pour une diode idéale. Nous allons traiter dans le prochain chapitre la position, le nombre et la largeur des anneaux de gardes dans une jonction p-n polarisé en inverse, pour s'approcher de la tension de claquage du cas idéal.

Chapitre 3 Optimisation des anneaux de garde

3.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation des résultats de simulation ainsi que la méthodologie adoptée relative à l'optimisation des anneaux de garde afin d'obtenir la tension de claquage la plus élevée.

Durant cette étude d'optimisation des anneaux de garde, nous avons choisi un dispositif semi-conducteur de type diode avec des dimensions et dopage bien définis.

Notre méthodologie d'optimisation consiste à faire varier le nombre d'anneaux de garde ainsi que leur espacement par rapport à la jonction et aussi entre eux. De plus, nous avons fait varier la largeur de l'anneau de garde afin d'observer l'influence de cette dernière sur la tension de claquage du dispositif semi-conducteur.

3.2 Optimisation du positionnement des anneaux de garde

L'optimisation du positionnement consiste à chercher la position optimum d'un anneau de garde dans une jonction p-n polarisée en inverse. Pour cela nous avons positionné un anneau de garde de largeur de $1\mu\text{m}$, de telle façon que le pas qui va prendre ce dernier pour s'éloigner de la région « p » est de l'ordre de $1\mu\text{m}$, cette optimisation a comme référence la tension de claquage. Cette tension est présentée en valeur absolue.

Par la suite nous avons gardé cette position pour un premier anneau de garde, et refaire le même processus pour un deuxième, et continuons jusqu'à arriver à un nombre optimum pour les anneaux de gardes pour une seul jonction p-n.

La tension de claquage est calculée quand le courant augmente de deux ordres de grandeur. C'est pour cela toutes les optimisations vont être observés pour $I = -5e-12$ A. Pour chaque optimisation de la position nous avons observé cette dernière par rapport

à cinq positions, et les résultats du graphe simulé par l’outil ATLAS sont en échelle logarithmique.

3.2.1 Optimisation du premier anneau de garde

Le positionnement du premier anneau de garde vis-à-vis de la jonction est présenté sur la figure 3.1. Les différents espacements du premier anneau de garde sont : 1 μm , 2 μm , 3 μm , 4 μm et 5 μm . Les résultats relatifs à chaque positionnement du premier anneau de garde sont présentés sur la figure 3.2.



Figure 3.1. Les différentes structures présentant le positionnement du premier anneau de garde simulées avec l’outil ATLAS de SILVACO.

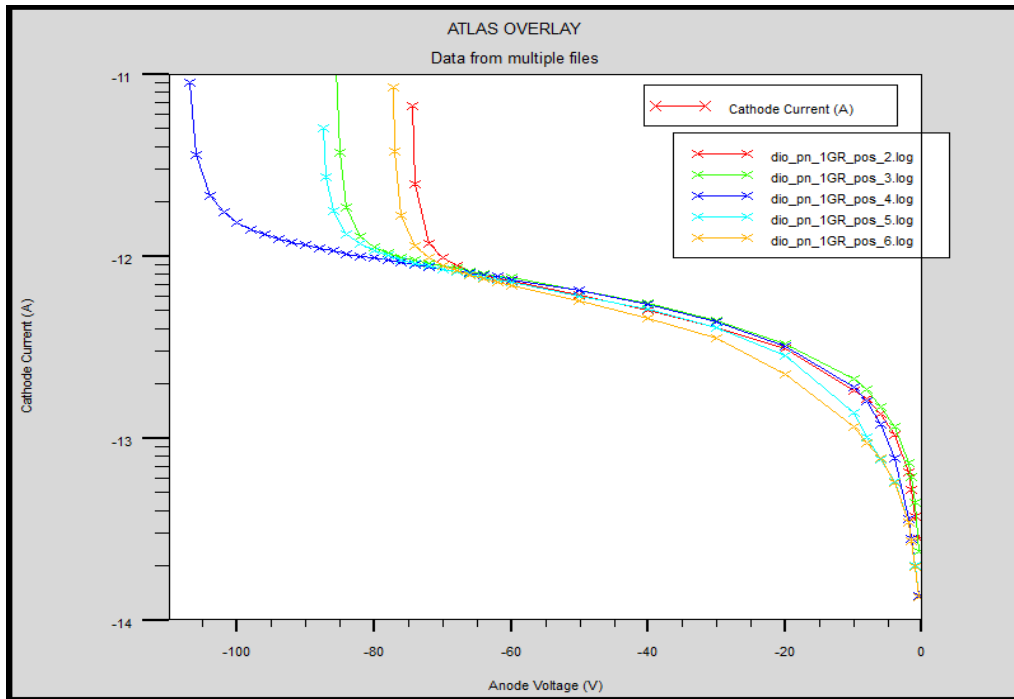


Figure 3.2. Caractéristiques courant-tension ($\log(I)$ -V) relatives aux différentes positions du premier anneau de garde vis-à-vis de la jonction p-n.

La figure 3.2 montre le graphe qui représente la variation de courant (I) en fonction de la tension (V), pour le premier anneau de garde. On remarque que la tension augmente en valeur absolue avec l'augmentation du courant jusqu'à arriver à la tension de claquage. Cette tension est différente pour chaque position. La figure 3.3 montre la tension de claquage pour chaque position.

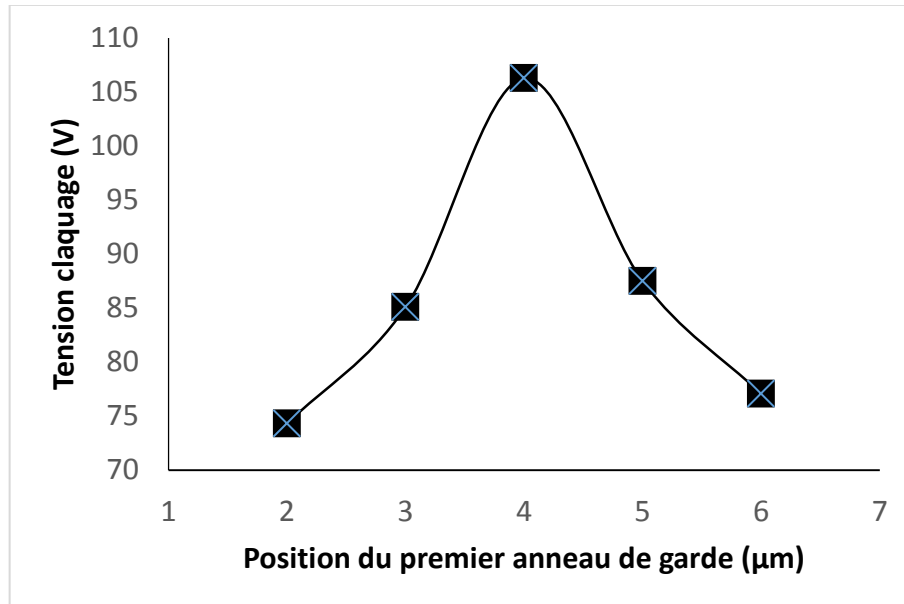


Figure 3.3. La tension de claquage en fonction du positionnement du premier anneau de garde.

La figure 3.3 montre le graphe qui présente la tension de claquage en fonction du positionnement du premier anneau de garde. On remarque une augmentation brusque de la tension de claquage et la plus grande se trouve à la position quatre, juste après cette position la tension diminue rapidement. D'après ce graphe la position optimum pour un premier anneau de garde ou la tension de claquage est maximum c'est la position quatre.

Nous avons pris cette position pour ce premier anneau de garde et nous allons chercher une autre position pour un deuxième anneau de garde.

3.2.2 Optimisation du deuxième anneau de garde

Le positionnement du deuxième anneau de garde vis-à-vis de la jonction est présenté sur la figure 3.4. Les différents espacements du deuxième anneau de garde sont : 6 μm , 7 μm , 8 μm , 9 μm et 10 μm . Les résultats relatifs à chaque positionnement de ce deuxième anneau de garde sont présentés sur la figure 3.5.

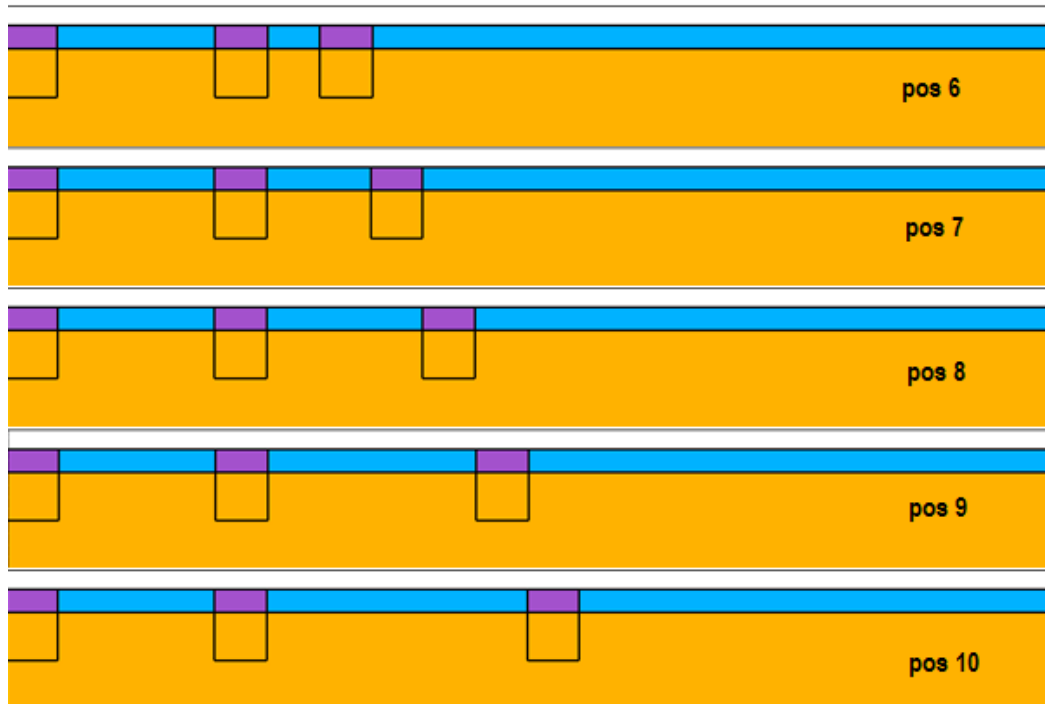


Figure 3.4. Les différentes structures présentant le positionnement du deuxième anneau de garde simulées avec l'outil ATLAS de SILVACO.

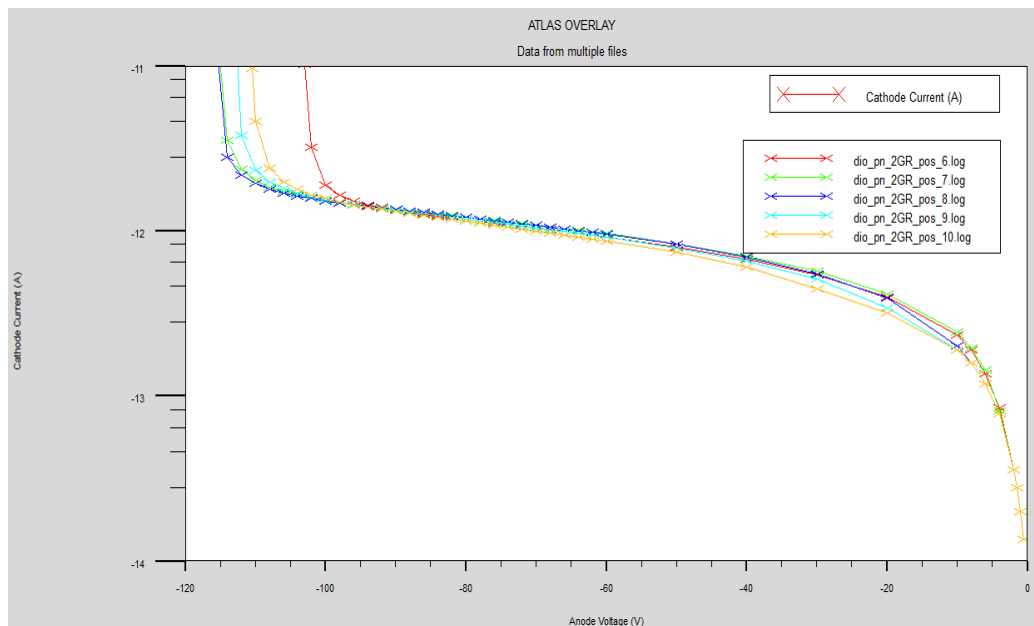


Figure 3.5. Caractéristiques courant-tension ($\log(I)$ -V) relatives aux différentes positions du deuxième anneau de garde vis-à-vis de la jonction p-n.

La figure 3.5 représente la variation de courant (I) en fonction de la tension (V), pour le deuxième anneau de garde. On remarque que la tension augmente en valeur absolue avec l'augmentation du courant jusqu'à arriver à la tension de claquage, cette tension

est différente pour chaque position, la figure 3.6 montre la tension de claquage pour chaque position.

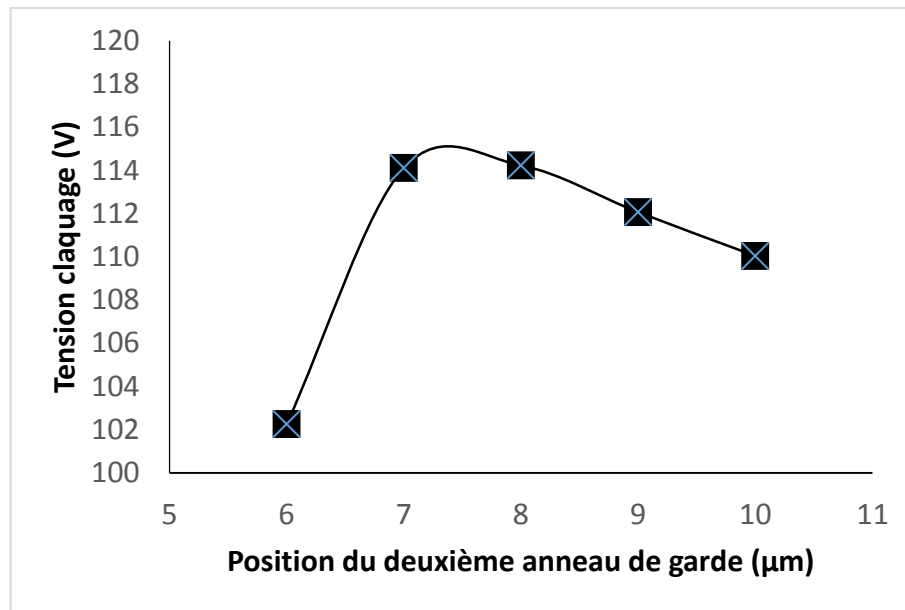


Figure 3.6. La tension de claquage en fonction du positionnement du deuxième anneau de garde.

La figure 3.6 montre le graphe qui présente la tension de claquage en fonction du positionnement du deuxième anneau de garde. On remarque que la tension de claquage augmente jusqu'à arriver à la position sept. Puis elle commence à diminuer. D'après ce graphe la position optimum pour un deuxième anneau de garde ou la tension de claquage est maximum c'est la position sept.

Nous avons pris cette position pour ce deuxième anneau de garde et nous allons chercher une autre position pour un troisième anneau de garde.

3.2.3 Optimisation du troisième anneau de garde

Le positionnement du troisième anneau de garde vis-à-vis de la jonction est présenté sur la figure 3.7. Les différents espacements du troisième anneau de garde sont : 9 μm , 10 μm , 11 μm , 12 μm et 13 μm . Les résultats relatifs à chaque positionnement de ce troisième anneau de garde sont présentés sur la figure 3.8.

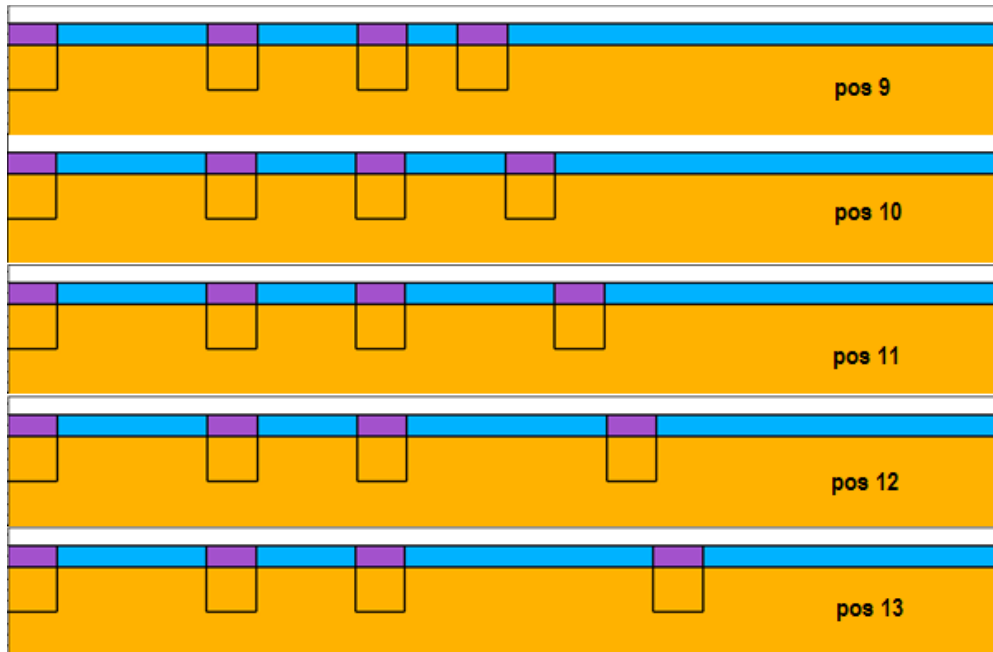


Figure 3.7. Les différentes structures présentant le positionnement du troisième anneau de garde simulées avec l’outil ATLAS de SILVACO.

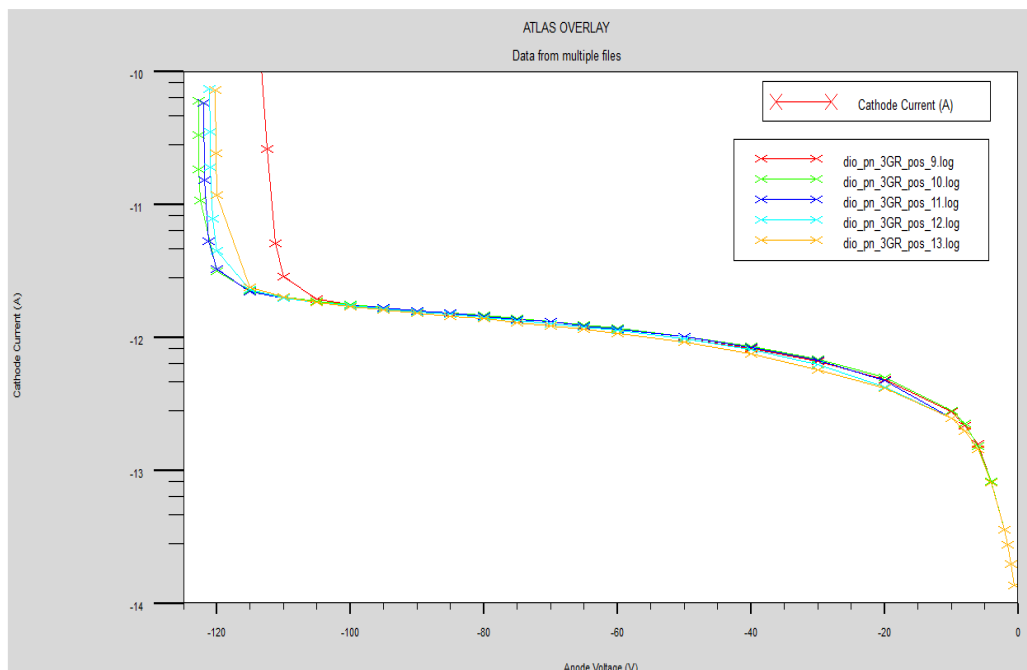


Figure 3.8. Caractéristiques courant-tension ($\log(I)$ -V) relatives aux différentes positions du troisième anneau de garde vis-à-vis de la jonction p-n.

La figure 3.8 montre le graphe qui représente la variation de courant (I) en fonction de la tension (V) pour le troisième anneau de garde. On remarque que la tension augmente en valeur absolue avec l’augmentation du courant jusqu’à arriver à la tension de claquage. Cette tension est très proche pour les positions 10, 11 et 12. La figure 3.9 montre la tension de claquage pour chaque position.

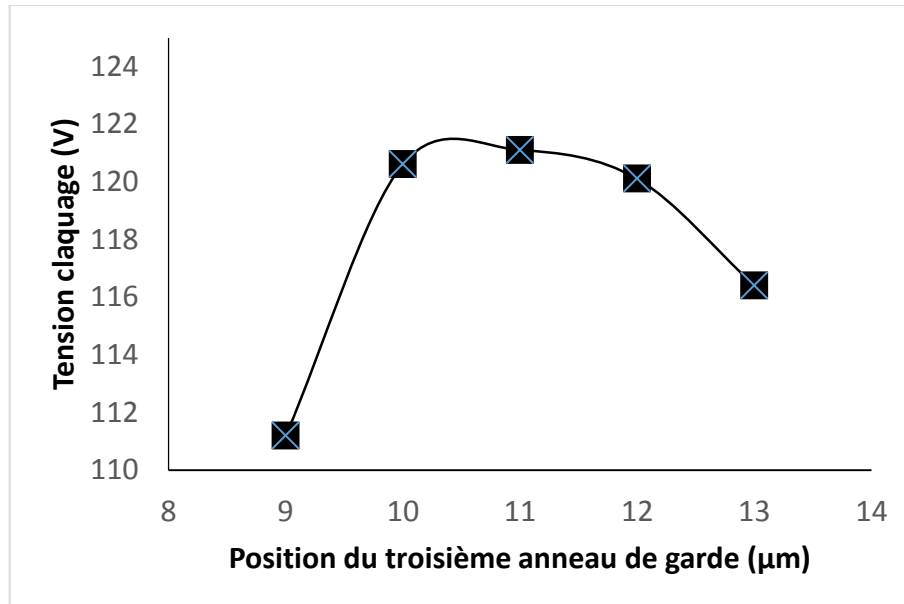


Figure 3.9. La tension de claquage en fonction du positionnement du troisième anneau de garde.

La figure 3.9 montre le graphe qui présente la tension de claquage en fonction du positionnement du troisième anneau de garde, On remarque que les tensions de claquage pour les positions 10, 11 et 12 sont proches mais la plus grande c'est la position onze donc c'est la position optimum pour un troisième anneau de garde ou la tension de claquage est maximum.

Nous avons pris cette position pour ce troisième anneau et nous allons chercher une autre position pour le quatrième anneau de garde.

3.2.4 Optimisation du quatrième anneau de garde

Le positionnement du quatrième anneau de garde vis-à-vis de la jonction est présenté sur la figure 3.10. Les différents espacements du premier anneau de garde sont : 13 μm , 14 μm , 15 μm , 16 μm et 17 μm . Les résultats relatifs à chaque positionnement de ce quatrième anneau de garde sont présentés sur la figure 3.11.

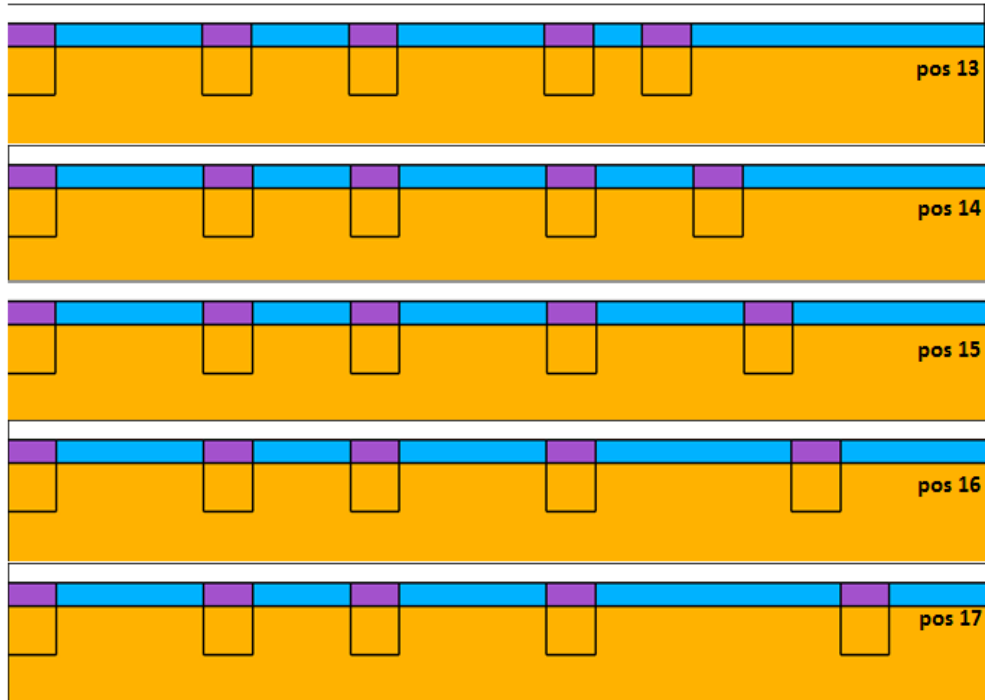


Figure 3.10. Les différentes structures présentant le positionnement du quatrième anneau de garde simulées avec l’outil ATLAS de SILVACO.

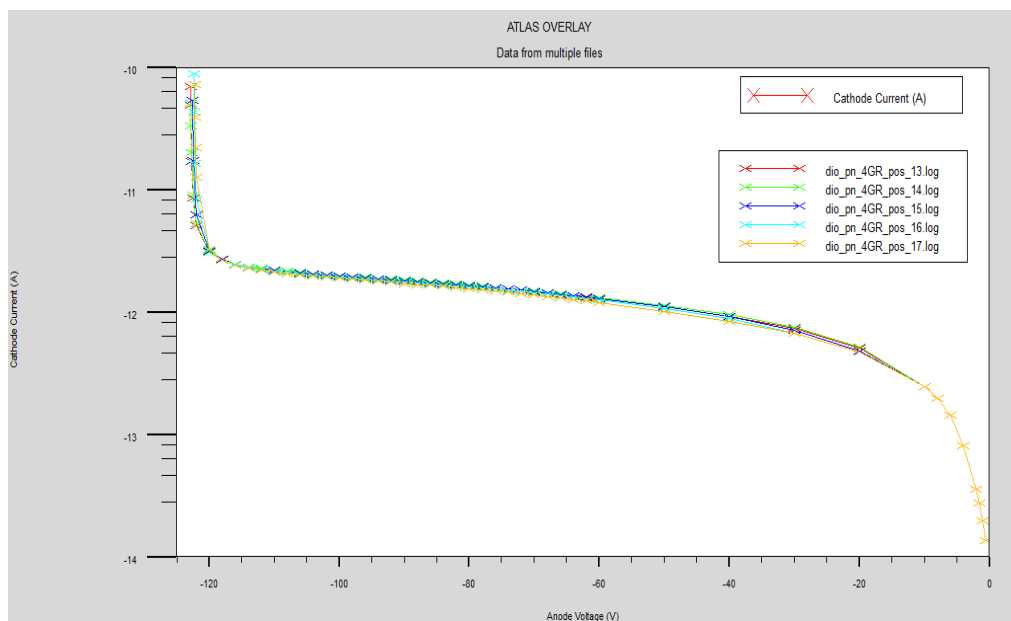


Figure 3.11. Caractéristiques courant-tension ($\log(I)$ -V) relatives aux différentes positions du quatrième anneau de garde vis-à-vis de la jonction p-n.

La figure 3.11 montre le graphe qui représente la variation de courant (I) en fonction de la tension (V) pour le quatrième anneau de garde. On remarque que les tensions sont presque les mêmes pour toutes les positions. Pour mieux observer ces tensions, la figure 3.12 montre la tension de claquage pour chaque position.

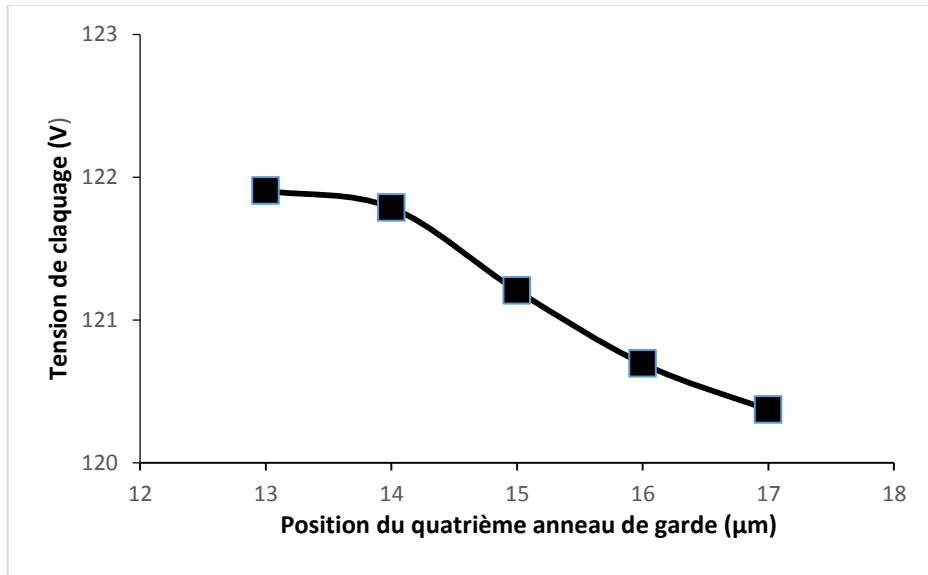


Figure 3.12. La tension de claquage en fonction du positionnement du quatrième anneau de garde.

La figure 3.12 montre le graphe qui présente la tension de claquage en fonction du positionnement du quatrième anneau de garde. On remarque que la tension la plus élevée se trouve à la position treize et juste après la position quatorze. On remarque une brusque diminution de la tension de claquage.

Pour ce quatrième anneau de garde nous avons pris comme position optimum, la position treize.

L'influence de ces quatre positions (position : 4, 7, 11 et 13) sur la jonction p-n polarisée en inverse est présentée en fonction de la tension de claquage sur la figure 3.13

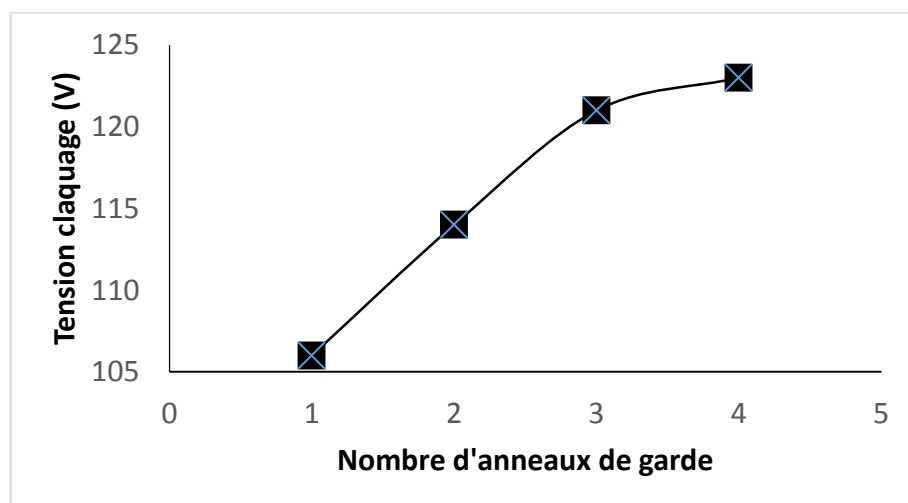


Figure 3.13. La tension de claquage en fonction du nombre d'anneau de garde.

La figure 3.13 présente le graphe de tension de claquage en fonction du nombre des anneaux de garde. On remarque que pour les trois premiers anneaux de garde (1, 2 et 3), l'augmentation de la tension de claquage est brusque et remarquable, par contre après la position 3 le changement de la tension de claquage est faible par rapport aux autres positions et la tension de claquage tend à se stabiliser à une valeur constante. D'après ces résultats il est inutile d'ajouter un autre anneau de garde, donc la structure d'une diode avec une tension de claquage élevée c'est celle avec quatre anneaux de garde.

3.3 Optimisation de la largeur de l'anneau de garde

Après l'observation de l'influence du positionnement et le nombre de l'anneau de garde nous avons observé aussi l'influence de la largeur de l'anneau de garde. Dans ce qui suit nous avons cherché l'influence de la largeur de l'anneau de garde par deux méthodes possibles, la première méthode c'est de garder la position de l'anneau de garde et augmenté la largeur d'un seul côté de l'anneau, la deuxième méthode c'est de garder le centre de l'anneau a sa position et faire varier la largeur vers les deux côtés de ce dernier. Pour cela on a choisi une jonction p-n avec un seul anneau de garde dans la position optimum (position 4).

3.3.1 Première méthode d'optimisation de la largeur

La largeur de l'anneau de garde du premier cas vis-à-vis de la jonction est présentée sur la figure 3.14. Les différentes valeurs de la largeur pour ce cas sont : 0.5 μm , 1 μm , 2 μm et 4 μm . Les résultats relatifs à chaque largeur du premier cas sont présentés sur la figure 3.15.

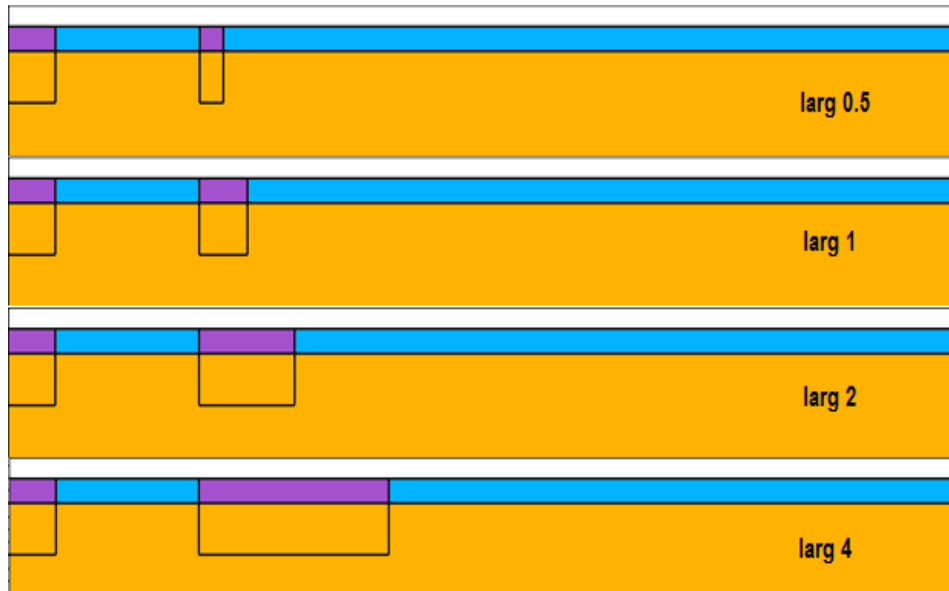


Figure 3.14. Les différentes structures présentant la largeur de la première méthode simulée avec l'outil ATLAS de SILVACO.

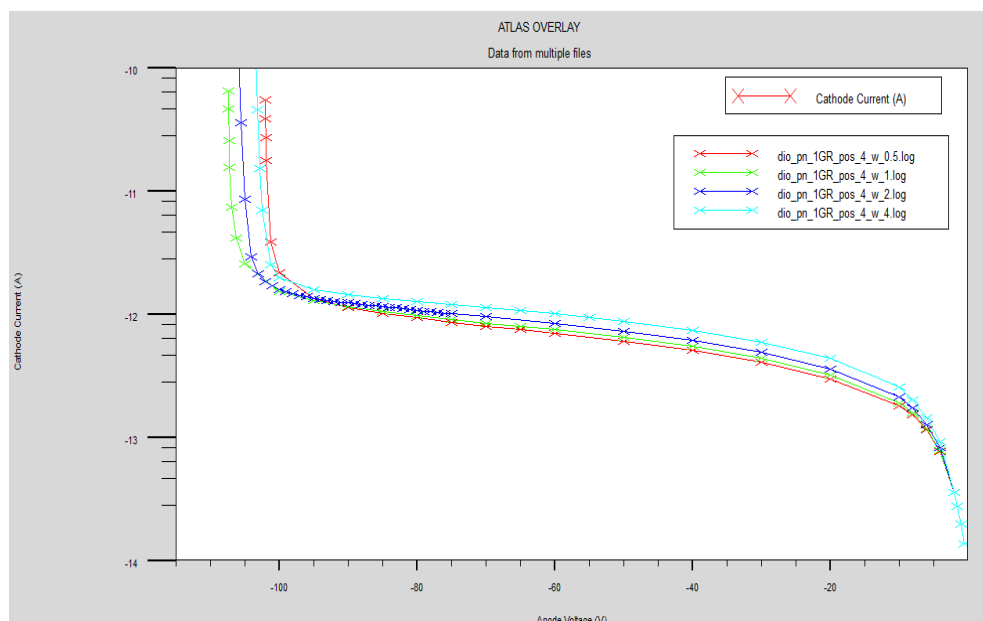


Figure 3.15. La tension de claquage en fonction de la largeur de la première méthode d'optimisations de la largeur.

La figure 3.15 représente la variation de courant (I) en fonction de la tension (V) en échelle logarithmique, pour une jonction p-n polarisée en inverse pour la première méthode d'optimisation de la largeur. On peut observer l'influence de la largeur de l'anneau de garde sur la tension e claquage de la première méthode d'optimisation sur la figure 3.16.

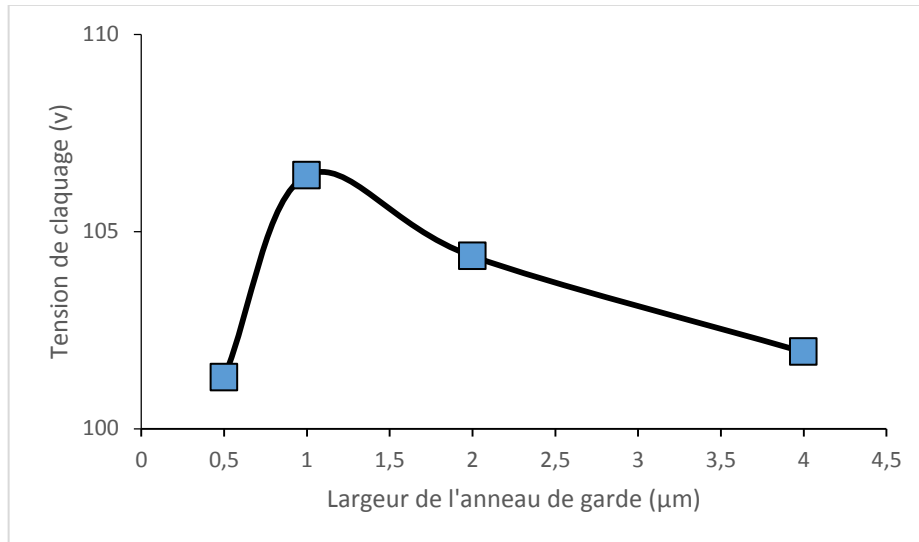


Figure 3.16. La tension de claquage en fonction de la largeur de l'anneau de garde extraite par la première méthode.

La figure 3.16 représente le graphe de la tension de claquage en fonction de variation de la largeur de l'anneau de garde. On remarque que la tension de claquage est maximum pour une largeur de l'anneau de garde qui vaut $1\mu\text{m}$ pour une tension de claquage $v= 106,4\text{V}$.

3.3.2 Deuxième méthode d'optimisation de la largeur

La largeur de l'anneau de garde de la deuxième méthode vis-à-vis de la jonction est présentée sur la figure 3.17. Les différentes valeurs de la largeur pour cette méthode sont : $1\mu\text{m}$, $2\mu\text{m}$, $3\mu\text{m}$ et $4\mu\text{m}$. Les résultats relatifs à chaque largeur de la deuxième méthode sont présentés sur la figure 3.18.

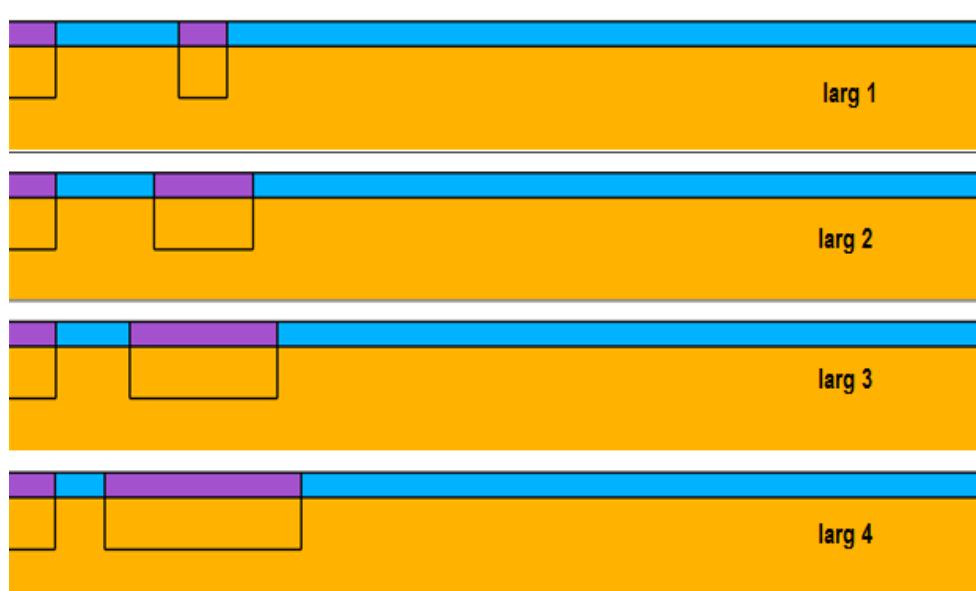


Figure 3.17. Les différentes structures présentant la largeur de la deuxième méthode simulée avec l'outil ATLAS de SILVACO.

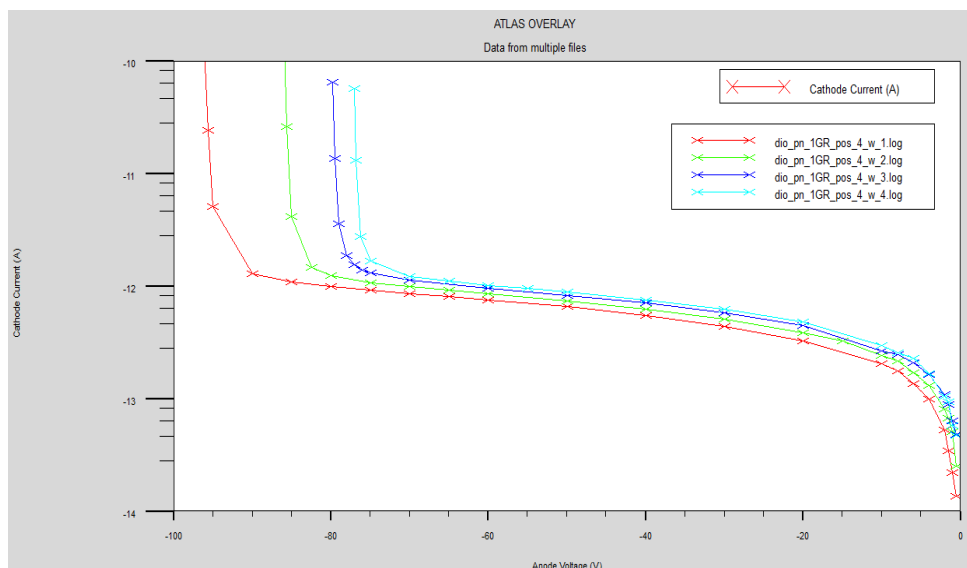


Figure 3.18. La tension de claquage en fonction de la largeur de la deuxième méthode d'optimisations de la largeur.

La figure 3.18 représente la variation de courant (I) en fonction de la tension (V) en échelle logarithmique, pour une jonction p-n polarisée en inverse pour la deuxième méthode d'optimisation de la largeur. On peut observer l'influence de la largeur de l'anneau de garde sur la tension de claquage de la deuxième méthode d'optimisation de la largeur sur la figure 3.19.

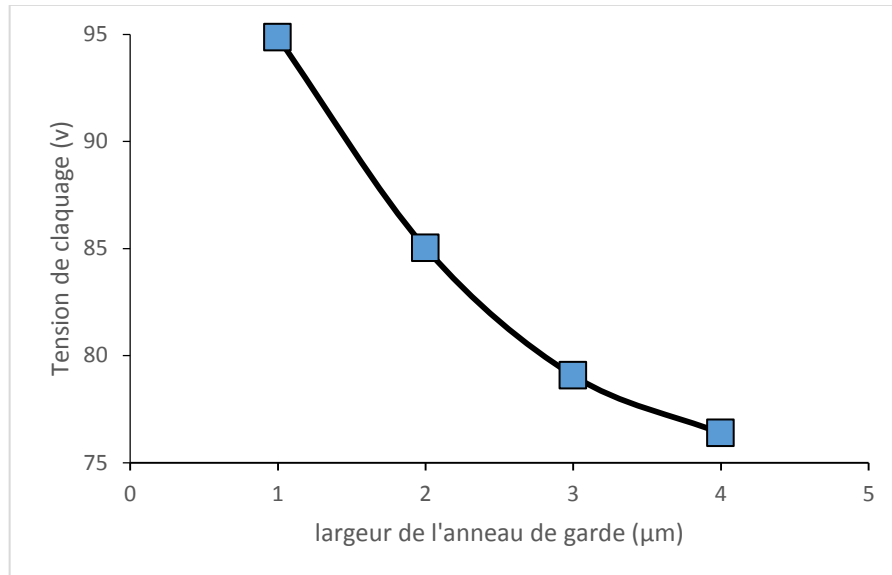


Figure 3.19. La tension de claquage en fonction de la largeur de l’anneau de garde extraite par la deuxième méthode.

La figure 3.19 représente le graphe de la tension de claquage en fonction de variation de la largeur de l’anneau de garde de la deuxième méthode d’optimisation. On remarque que la tension de claquage est maximum ($v= 106\text{V}$) pour une largeur de l’anneau de garde qui vaut $1\mu\text{m}$.

D’après les résultats de la première et la deuxième méthode d’optimisation de l’anneau de garde, la première méthode donne une tension de claquage plus élevée que la deuxième méthode pour les différentes largeurs.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné les processus et les résultats de simulation par l’outil ATLAS. Nous avons commencé par le positionnement de l’anneau de garde dans une jonction p-n polarisée en inverse pour avoir une tension de claquage la plus élevée possible. Afin de continuer à augmenter cette tension nous avons cherché le nombre qu’il faut des anneaux de garde dans la même jonction et à la fin nous avons augmenté la largeur de l’anneau de garde par l’utilisation de deux méthodes.

On a obtenu à la fin de ce travail une jonction p-n avec quatre anneaux de garde dont les positions sont 4, 7, 11 et 13 et la largeur pour chaque anneau de garde est de l’ordre de $1\mu\text{m}$. Lorsque la jonction est polarisée en inverse nous avons pu atteindre une tension de claquage proche relativement de celle du cas d’une diode parfaite comme le montre la figure 3.20 :

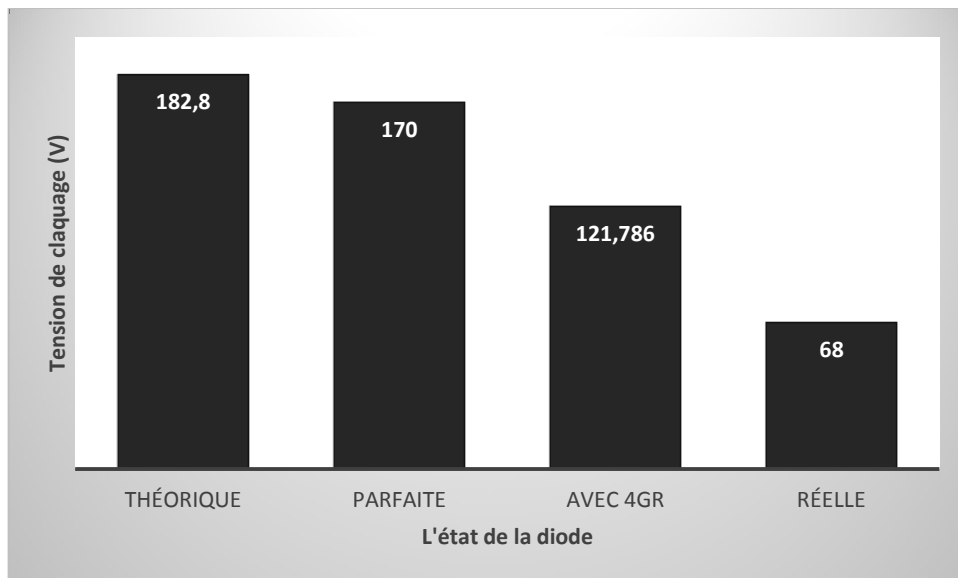


Figure 3.20. Variation de la tension de claquage en fonction de l'état de la diode (original).

Conclusion générale

Le travail effectué dans le cadre de ce projet de fin d'études porte sur l'influence de la présence des anneaux de garde autour de la jonction pn. Le but de cette étude est de comprendre l'influence de la position et du nombre de ces anneaux de garde sur les performances de la diode principalement en termes de tension de claquage.

Cette étude a été effectuée à l'aide du simulateur professionnel Silvaco-TCAD où nous avons exploité un de ses outils de simulation qui est ATLAS.

Dans un premier temps, nous avons déterminé la position optimum du premier anneau de garde qui permet d'obtenir la tension de claquage la plus élevée. Par la suite nous avons fait le même travail pour le deuxième anneau de garde et ainsi de suite. Nous sommes arrivés à la conclusion qu'à partir d'un certain nombre d'anneaux de garde il est inutile d'en rajouter d'autres car la tension de claquage va devenir constante et indépendante de leurs nombre. De plus il sera inutile d'augmenter la surface occupée par le composant.

Bibliographie

- [1] B.KAGHOUCHE, “ Etude par TCAD-SILVACO d’une structure MOS pour la réalisation de capteurs ISFET : paramètres technologiques et électroniques”, mémoire de magister en électronique Université Mentouri – Constantine, 2010.
- [2] F.BOUROUBA, “ Modilisation et simulation des contacts métal-semiconducteur à barrière inhomogène “ mémoire de magister en électronique Université FERHAT ABBAS-SETIF, 2010
- [3] H.Mathieu, «Physique des semiconducteurs et des composants électroniques, 2ème Edition, Masson, 1990.
- [4] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Diode#Fabrication>
- [5] http://fr.wikipedia.org/wiki/Jonction_P-N
- [6] http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/co/Contenu_07.html
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Impact_ionization
- [8] http://fr.wikipedia.org/wiki/Tension_de_claquage#Diodes
- [9] http://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_%C3%A9lectrique#Champ_.C3.A9lectrostatique
- [10] http://users.polytech.unice.fr/~lorenz/Homo_jonction.pdf
- [11] http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/co/Contenu_05.html
- [12] [:http://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_%C3%A9lectrique#D.C3.A9finition_qualitative_du_champ_.C3.A9lectrique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Champ_%C3%A9lectrique#D.C3.A9finition_qualitative_du_champ_.C3.A9lectrique)
- [13] A.ABDELALI, « Rôle du rayonnement dans l’élaboration et l’étude de nano agrégats semi-conducteur de ZnS », Mémoire présente pour le diplôme de magister en physique, Université MENTOURI CONSTANTINE,

[14] http://florentportelatine.perso.sfr.fr/electronique/cours/web_jonction_pn.jpg

[15] Adler MS, Temple VAK, Ferro AP, Rustay RC. Theory and breakdown voltage for planar devices with a single field limiting ring. IEEE Trans Electron Dev 1977;24(2), pp 107,13.

[16] B.J. Baliga, « Power semiconductor devices », Boston, PWS Publishing Co, 1995.

[17] Z. Makhlouf : “Étude classique et quantique de l’hétérojonction AlGaAs/GaAs” Mémoire de fin d’étude en Physique des Matériaux Université Med Khider Biskra, 2013