

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 دحلبان بالبيدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Spécialité Électronique
Option Micro-optoélectronique

présenté par

BOUBEKEUR Amar

&

CHARFI Mohamed

Etude par TCAD-SILVACO des effets des radiations sur des détecteurs pixels de type p

Proposé par : **Mr. OUSSALAH Slimane & Mr. NACER said**

Année Universitaire 2016-2017

Remerciements

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

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

Nous tenons à remercier :

- *Monsieur Slimane OUBOZALAH, chercheur au sein de la Division Microélectronique et Nanotechnologie du Centre de Développement des Technologies Avancées de m'avoir proposé ce sujet, encadré, aidé et orienté.*
- *Monsieur Saïd NAFFER enseignant chercheur à l'Université de Elida, d'avoir accepté de me Co-encadrer. Ses remarques et ses conseils m'ont été d'une grande utilité pour mener à terme ce travail.*
- *Les membres du jury d'avoir accepté d'examiner et d'apprécier mon travail.*
- *Que ma mère et mon père, 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 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 قمنا بإجراء دراسة مقارنة عن تأثير الإشعاع المؤين علي اثنين من أجهزة الكشف عن اشباه الموصلات مع ركيزة من النوع P و لكن عصابات الحرس مختلفة. وقد اجرت هذه الدراسة باستخدام أدوات محاكاة من البرامج SILVACO TCAD. قمنا بتغيير العديد من المعلمات مثل المنشطات الركيزة و تأثير الإشعاع و الحمل داخل الاكسيد. و اظهرت نتائج المحاكاة ان كاشف مع حلقات نوع حارس P لا يقدم افضل أداء كهربائي في فترة انهيار الجهد و التسرب الحالي مقابل نوع n.

كلمات المفاتيح: الإشعاعات المؤينة، انهيار الجهد، محاكاة

Résumé : Dans ce travail nous avons fait une étude comparative sur l'influence des radiations ionisantes sur deux détecteurs à semi-conducteurs avec un substrat de type p mais avec des anneaux de garde différents. Cette étude a été menée à l'aide des outils de simulation TCAD du logiciel Silvaco. Nous avons fait varier plusieurs paramètres comme le dopage du substrat, l'influence des radiations et la charge induite présente dans l'oxyde. Les résultats obtenus de la simulation ont montré que le détecteur avec des anneaux de garde de type n offre de meilleurs performances électriques en terme de tension de claquage et de courant de fuite par rapport à ceux de type p.

Mots clés : rayonnements ionisants; panne de tension ; simulations Silvaco.

Abstract : In this work we made a comparative study about the influence of the ionized radiations on two p-type semi conductor detectors with different doping type of guard rings using the TCAD SILVACO simulation tools. We have varied multiple parameters like the substrate doping, the fluence of radiation, and the induced oxide charges. The results obtained from the simulation showed that the detector with n-type guard rings gives better electric performances in terms of breakdown voltage and the leakage current than the one with p-type guard rings.

Keywords : ionising radiations ; power failure ; simulations Silvaco

Listes des acronymes et abréviations

- P***: Dopage de type accepteur (densité des trous).
- n***: Dopage de type donneur (densité des électrons).
- n_i***: Densité de porteurs libres intrinsèques (cm⁻³).
- q***: Charge électrique élémentaire (-1.6×10⁻¹⁹).
- ε₀***: Permittivité absolue du vide (8.85×10⁻¹² F.m⁻¹).
- ε_r***: Permittivité relative du matériau (F.m⁻¹).
- Ψ***: Potentiel électrostatique (V).
- ρ***: Densité de volumique (cm⁻³).
- μ_n***: Mobilité des électrons (cm²V⁻¹S⁻¹).
- μ_p***: Mobilité des trous (cm²V⁻¹S⁻¹).
- Z***: Le nombre atomique.
- T***: Température (k).
- DC***: « Courant direct ».
- AC***: « courant alternatif ».
- BC***: bande de conduction.
- BV***: bande de valence.
- V***: La tension (V).
- V_{bi}***: La tension « building » (V).
- V_c***: Tension de claquage (V).
- W***: Largeur de charge d'espace (cm).
- Ñ***: Gradient.
- N_a***: Densité de dopants accepteurs ionisés dans un matériau P (cm⁻³).
- N_d***: Densité de dopants donneurs ionisés dans un matériau N (cm⁻³).
- G_n***: Taux de génération des électrons.
- G_p***: Taux de génération des trous.
- 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 ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$).

D_n : Coefficient de diffusion des électrons.

D_p : Coefficient de diffusion des trous.

K : Constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)

e_{nd} : Les taux d'émission électrons.

e_{pd} : Les taux d'émission trous.

F_{ta} : Probabilité d'ionisation accepteur.

F_{td} : Probabilité d'ionisation donneur.

$C_{cn,p}$: Le coefficient de capture d'un électron.

$C_{ce,p}$: Le coefficient d'émission d'un électron.

SIGN: les sections support de capture pour les électrons.

SIGP: les sections support de capture pour les trous.

f_{ta} : La probabilité d'occupation des pièges accepteurs.

f_{td} : La probabilité d'occupation des pièges donneurs.

TeV: Tetra electron volt (10^{12}eV).

LHC: Large Hadron Collider .

LHCb: Large Hadron Collider beauty experiment.

CMS: Compact Muon Solenoid.

ALICE: A Large Ion Collider Experiment.

CREN: Conseil européen pour la Recherche Nucléaires .

ATLAS : A Toroidal Lhc Apparatus

TCAD : Technology Computer Aided Design

Liste des figures

Figure 1.1: Silicium dopé au phosphor.....	5
Figure 1.2: Silicium dopé au bore	6
Figure 1.3: jonction PN à l'équilibre.....	11
Figure 1.4 : Jonction PN polarisée en inverse.....	12
Figure 1.5: L'expansion de la zone charge d'espace pour différent tension de la structure n-on-p-GRP.....	13
Figure 1.6: Claquage par avalanche.....	14
Figure 1.7: Principe de fonctionnement d'un détecteur a jonction semi-conductrice.....	16
Figure 1.8: Représentation schématique d'un detecteur microstrip.....	17
Figure 1.9: Représentation schématique d'un détecteur planaire.....	18
Figure 1.10: Représentation schématique d'un détecteur 3D.....	19
Figure 1.11: Représentation schématique des effets de surface.....	20
Figure 1.12: different surface isolation techniques:p-spray(a),p-stop(b) et p-spray moder	21
Figure 1.13: a) Formation du vacant due au déplacement d'atome silicium, b) formation des interstitiels due aux réarrangements après dispersion.....	22
Figure 2.1: Le rôle de la simulation.....	24
Figure 2.2: Environnement virtuel de fabrication des plaquettes de Silvaco [8].....	25
Figure2.3: L'environnement ATLAS [10].....	26
Figure2.4: Définition du maillage avec Atlas.....	29
Figure2.5: Définition des régions avec Atlas.....	29
Figure2.6: Définition des électrodes avec Atlas.....	30
Figure2.7: Types et niveau de dopage avec Atlas.....	30
Figure2.8: Des courbes de l'échantillon IV.....	31
Figure3.1: Vue schématique de la structure n-on-p avec des anneaux de garde de type p nommée n-on-p-GRP.....	39

Figure3.2 : Vue schématique de la structure n-on-p avec des anneaux de garde de type n nommée n-on-p-GRN.....	39
Figure3.3 : Caractéristiques courant-tension de la structure avec et sans anneaux de garde de type n et sans p-spray.....	40
Figure3.4 : Le champ électrique de la structure n-on-p-GRN sans et avec anneau de garde à une tension de polarisation de 100V.....	41
Figure3.5 : Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs du dopage du substrat pour la structure n-on-p-GRP.....	42
Figure3.6 : Variation de la tension de claquage en fonction du dopage du substrat de la structure n-on-p-GRP.....	42
Figure3.7 : Variation du courant de fuite en fonction du dopage du substrat de la structure n-on-p-GRP.....	43
Figure3.8 : Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs du dopage du substrat pour la structure n-on-p-GRN sans p-spray.....	44
Figure3.9 : Variation de la tension de claquage en fonction du dopage du substrat n-on-p-GRN avec p-spray.....	44
Figure3.10 : Variation du courant de fuite en fonction du dopage du substrat n-on-p-GRN(sans p-spray).....	45
Figure3.11 : Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs du dopage du substrat pour la structure n-on-p-GRN avec p-spray.....	46
Figure3.12 : Variation de la tension de claquage en fonction du dopage du substrat de la structure n-on-p-GRN(avec p-spray).....	46
Figure3.13 : Variation du courant de fuite en fonction du dopage du substrat de la structure n-on-p-GRN (avec p-spray).....	47
Figure3.14 : Caractéristiques courant-tension de différentes structures sans charges dans l'oxyde.....	47
Figure3.15 : Le champ électrique de différentes structures sans charges de l'oxyde à une tension de polarisation de 100V.....	48
Figure3.16 : Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de la charge de l'oxyde de la structure n-on-p-GRP.....	48
Figure3.17 : Variation de la tension de claquage en fonction de la charge de l'oxyde de la structure n-on-p-GRP.....	49
Figure3.18 : Variation de courant de fuite en fonction de la charge de l'oxyde dans la structure n-on-p-GRP.....	50

Figure3.19 : Vue schématique de la structure n-on-p-GRP avec le premier anneau de garde montrant le profil de la concentration des électrons sous une tension de 100V	51
Figure3.20 : Profil de la concentration des électrons et des trous de la structure de la figure 3.19 après une ligne de coupe à 0.1µm de la surface.....	52
Figure3.21 : Profil du potentiel de la structure de la figure 3.19 après une ligne de coupe à 0.1µm de la surface.....	52
Figure3.22 : Profil du champ électrique de la structure de la figure 3.19 après une ligne de coupe à 0.1µm de la surface.....	53
Figure3.23 : Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de la charge de l'oxyde n-on-p-GRN (sans p-spray).....	53
Figure3.24 : Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de la charge de l'oxyde n-on-p-GRN (avec p-spray).....	54
Figure3.25 : Variation de la tension de claquage en fonction de la charge de l'oxyde n-on-p-GRN (avec p-spray).....	55
Figure3.26 : Variation de courant de fuite en fonction de la charge de l'oxyde n-on-p-GRN (avec p-spray).....	56
Figure3.27 : Vue schématique de la structure n-on-p-GRN avec le premier anneau de garde montrant le profil de la concentration des électrons sous une tension de 100V	57
Figure3.28 : Profil de la concentration des électrons et des trous de la structure de la figure 3.27 après une ligne de coupe à 0.1µm de la surface.....	58
Figure3.29 : Profil du potentiel de la structure de la figure 3.27 après une ligne de coupe à 0.1µm de la surface.....	59
Figure3.30 : Profil du champ électrique de la structure de la figure 3.27 après une ligne de coupe à 0.1µm de la surface.....	59
Figure3.31 : Caractéristiques courant-tension de différente structure avec charges de l'oxyde.....	60
Figure3.32 : Le champ électrique de différentes structures avec charges de l'oxyde sous une de polarisation de 100V.....	61
Figure3.33 : Caractéristiques courant-tension de la structure n-on-p-GRP pour différentes valeurs de fluence après charge dans l'oxyde de $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	62
Figure3.34 : Variation de la tension de claquage en fonction de la fluence structure n-on-p-GRP.....	63

Figure3.35 : Variation du courant de fuite en fonction de la fluence structure n-on-p-GRP.....	64
Figure3.36 : Caractéristiques courant-tension de la structure n-on-p-GRN (avec p-spray) pour différentes valeurs de fluence après charge dans l'oxyde de $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	65
Figure3.37 : Variation de la tension de claquage en fonction de la fluence de la structure n-on-p-GRN (avec p-spray).....	66
Figure3.38 : Variation de courant de fuite en fonction de la fluence n-on-p-GRN (avec p-spray).....	67
Figure3.39 : Caractéristiques I-V de la structure n-on-p-GRP pour différentes valeurs de la charge dans l'oxyde après une fluence de $1 \times 10^{15} \text{ neq/cm}^2$	68
Figure3.40 : Caractéristiques courant-tension de la structure n-on-p-GRN pour différentes valeurs de la charge dans l'oxyde après une fluence de 10^{15} neq/cm^2	69

Liste des tableaux

Tableau2.1 : ATLAS groupes de commandes avec les états principal de chaque.....	26
Tableau3.1 : Résumé des valeurs adoptées pour la simulation des deux structures avec l'outil TCAD SILVACO.....	51

Table des matières

Remerciements

ملخص

Résumé

Abstract

Listes des acronymes et abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....1

Chapitre 1 :Conception théorique.

1.1	Introduction.....	4
1.2	1.2présentation de CREN.....	5
1.3	principe de base des semi-conducteurs.....	7
1.3.1	semi-conducteur extrinsèque	7
	a Dopage type n	
	b Dopage type p	
1.4	Les equations fondamentale	8
1.4.1	Equations de Poisson	5
1.4.2	Equation de Continuité	5
1.4.3	Equation de Transport	6
	a Courant de Diffusion.....	6
	b Courant de Conduction.....	7
1.5	La jonction PN.....	10
1.5.1	principe	10
1.6	Polarisation de la jonction PN.....	12
1.6.1	Polarisation en inverse.....	13
1.6.2	Déplétion totale de la zone de charge d'espac.....	13
1.6.3	Phénomène de claquage.....	13

1.7	Détecteur de particule à base de semi conducteur.....	13
1.7.1	Les détecteurs de particules au silicium (Si).....	13
1.7.2	Différents types de détecteurs.....	13
a	Microstrip.....	14
b	Planaire.....	14
1.8	Effet des radiations sur les détect.....	15
1.8.1	En surface.....	16
1.8.2	En volume.....	17
1.9	Conclusion.....	25

Chapitre 2 : logiciel de simulation Silvaco

2.1	Introduction.....	27
2.2	Le rôle de la simulation	28
2.3	TCAD Silvaco	28
2.4	Logiciel de simulation «Silvaco-Atlas».....	29
2.5	Présentation Atlas	29
2.6	Ordre des commands.....	30
2.6.1	Spécification de la structure.....	31
a	Maillage.....	31
b	Régions.....	32
c	Electrodes.....	32
d	Doping.....	32
2.6.2	Spécification des modèles des matériaux.....	32
a	Matériau.....	32
b	Modèles physiques.....	33
c	Contact.....	33
d	Interface.....	33

2.6.3	Sélection de la méthode numérique	33
a	Methode Gummel	34
b	Methode Newton	34
c	Methode Block.....	34
2.6.4	Spécification des solutions.....	34
a	Log.....	34
b	Solve.....	34
c	Load et save.....	35
2.4.5	Analyse des résultats.....	35
2.7	Spécification despièges	36
2.5.1	Charge piégée dans l'équation de Poisson	36
2.5.2	La commande TRAP.....	37
2.8	Conclusion.....	38
 Chapitre 3 : Résultats et discussion		
3.1	Introduction.....	40
3.2	Simulation de la structure avec l'outil de simulation ATLAS.....	40
3.3	Description de la structure.....	41
3.4	Effet des paramètres technologiques les caractéristiques électriques non irradiées.....	42
3.4.1	Anneau de garde.....	43
3.4.2	Dopage de substrat.....	45
a	Structure avec anneaux de garde de type p.....	46
b	Structure avec anneaux de garde de type n.....	47
3.4.3	Charge ans l'oxyde.....	47
a	Structure avec anneaux de garde de type p.....	47

b	Structure avec anneaux de garde de type n.....	48
3.5	Effet des paramètres technologiques les caractéristiques électriques sous irradiation.....	49
3.5.1	Influence des pièges dans la bande interdite	
a	Structure avec anneaux de garde de type <i>p</i>	50
b	Structure avec anneaux de garde de type n.....	51
3.5.2	Influence des charges dans l'oxyde.....	52
a	Structure avec anneaux de garde de type <i>p</i>	53
b	Structure avec anneaux de garde de type n.....	54
3.5	Conclusion.....	55
	Conclusion générale.....	58
	Références bibliographiques	

Introduction générale

La détection de rayonnements fait toujours l'objet de nombreuses recherches. Les besoins de la physique nucléaire ont conduit à chercher des détecteurs permettant de couvrir un très grand angle solide avec une résolution en énergie la meilleure possible. Les détecteurs à semi-conducteur permettent de couvrir ces besoins.

Les détecteurs à semi-conducteurs utilisés dans le grand collisionneur LHC de l'expérience ATLAS sont exposés à de hautes fluences de radiations dues à leurs proximités au point d'interaction ce qui leur cause des détériorations inévitables.

Expérimentalement, les caractéristiques électriques d'un détecteur changent d'allure lorsqu'il est soumis à des rayonnements. Ce changement est dû essentiellement aux défauts introduits dans le volume du silicium à travers de pièges dans la bande interdite et en surface par l'accumulation de charges positives dans l'oxyde de silicium. Parmi les effets de ces défauts, on citera à titre d'exemple, la chute de la tension de claquage, l'augmentation du courant de fuite, la diminution de l'efficacité de collection des charges, etc.

Cette étude a pour but de comparer deux détecteurs à semi-conducteurs différents et faire des analyses par des modèles spécifiques afin d'évaluer les principaux paramètres influents sur les caractéristiques électriques pour une meilleure conception de ces détecteurs de particules hautement résistant aux radiations.

Notre mémoire est composé comme indiqué ci-dessous.

Le premier chapitre aborde les concepts théoriques des semi-conducteurs, le principe de détection et le phénomène d'irradiation sur les détecteurs.

Le second chapitre traite le simulateur technologique SILVACO, ou nous présentons son principe, son mode de fonctionnement, ses commandes avec des exemples pour son illustration.

Le troisième chapitre est consacré à discuter les résultats de simulation de deux détecteurs à semi-conducteurs de type p avec des anneaux de garde de type différents, appelés n-on-p-GRP et n-on-p-GRN. Pour cela nous faisons varier plusieurs paramètres. Tout d'abord, nous étudions l'effet du dopage de substrat ensuite l'effet des charges d'interface sur les caractéristiques courant-tension, après nous étudierons l'effet de la fluence. Puis, nous étudierons l'effet des charges avec une fluence constant. Enfin, nous terminerons par une conclusion.

Chapitre 1 Conception théorique.

1.1 Introduction

Dans l'ensemble des matériaux, les semi-conducteurs constituent une classe bien définie, avec des propriétés physiques particulières qui sont sources d'intérêt au plan de la connaissance fondamentale et à celui des applications. Ces deux facteurs indissociables font l'importance de ces matériaux, malgré le nombre limité d'élément et de composés semi-conducteurs [1].

Les détecteurs à base de semi-conducteurs ont généralement une structure p-n, p-i-n ou des structures similaires. Des études profondes ont été faites sur les détecteurs de différents types de particules (particule α , rayons x, neutrons, ...etc.). Dans la physique des hautes énergies les détecteurs de particules sont principalement composés de semi-conducteur de type diodes (jonction pn, pin, Schottky) fabriqués à partir de deux types de semi-conducteurs Si et GaAs[2].

1.2 Présentation du CERN

Le CERN, l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire, fut créé en 1954 par une convention entre 12 états européens. L'objectif de cette convention était de mettre en commun les moyens humains, techniques et financiers de chaque pays afin de concevoir et d'utiliser de grands instruments pour la physique nucléaire et la physique des particules. Le CERN compte aujourd'hui 20 états membres et 8 états observateurs.

Le CERN emploie aujourd'hui environ 2500 personnes qui couvrent un large éventail de compétences et de métiers : physiciens, ingénieurs, programmeurs, techniciens, ouvriers qualifiés, administrateurs, secrétaires, etc... D'autre part, environ 6500 scientifiques, soit la moitié des physiciens des particules au monde, viennent au CERN pour leur travail de recherche. Ils représentent 500 universités ou instituts et plus de

80 nationalités.

Parmi les avancées techniques que le CERN a permis de trouver, entre autre, l'imagerie médicale et le World-Wide Web. Mais les scientifiques responsables de ces développements ne s'intéressaient pas prioritairement à la médecine et aux ordinateurs. Les chambres proportionnelles multi-fils inventées en 1968 (par Georges Charpak, prix Nobel de physique 1992) pour détecter des particules sont désormais utilisées en médecine et en biologie. Le World Wide Web a été originellement conçu et développé (à la fin de 1990 par Tim Berners-Lee) pour pouvoir partager à tout instant des informations entre physiciens travaillant dans différentes universités et instituts aux quatre coins du monde. Le Web a maintenant des millions d'utilisateurs aussi bien dans le milieu académique que commercial[3].

1.3 Principe de base des semi conducteurs

1.3.1 Semiconducteur extrinsèque

Un semi-conducteur devient extrinsèque si on lui ajoute des atomes étrangers en faible proportion (dopage) le dopage permet de modifier les propriétés électrique d'un S.C.

Il existe deux types de dopage.

a Dopage type n

Le dopage de type N consiste à augmenter la densité en électrons dans le semi-conducteur. Pour ce faire, on inclut un certain nombre d'atomes riches en électrons dans le semi-conducteur. Par exemple, dans le cas du silicium (Si), les atomes de Si ont quatre électrons de valence, chacun étant lié à un atome O voisin par une liaison covalente formant un tétraèdre. Pour doper le silicium en N, on inclut un atome ayant cinq électrons de valence, comme ceux de la colonne V (VA) de la table périodique: le phosphore (P), l'arsenic (As) ou l'antimoine (Sb). Cet atome incorporé dans le réseau cristallin présentera quatre liaisons covalentes et un électron libre. Ce cinquième électron, qui n'est pas un électron de liaison, n'est que faiblement lié à l'atome et peut être facilement excité vers la bande de conduction. Aux températures ordinaires, quasiment tous ces électrons le sont. Comme l'excitation de ces électrons ne conduit

pas à la formation de trous dans ce genre de matériau, le nombre d'électrons dépasse de loin le nombre de trous. Les électrons sont des porteurs majoritaires et les trous des porteurs minoritaires. Et parce que les atomes à cinq électrons ont un électron supplémentaire à «donner», ils sont appelés atomes donneurs.

Les atomes peuvent être de la colonne V si le cristal initial est constitué d'atomes de la colonne IV. La figure (1.1) donne l'exemple de silicium dopé au phosphore qui possède cinq électrons sur la couche externe[11].

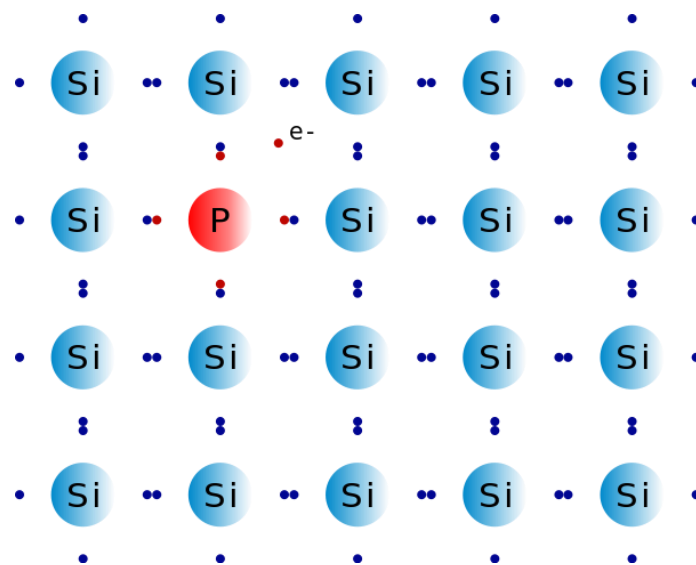


Figure1.1 Silicium dopé au Phosphore[11].

b Dopage type p

Le dopage de type P consiste à augmenter la densité en trous dans le semi-conducteur. Pour le faire, on inclut un certain nombre d'atomes pauvres en électrons dans le semi-conducteur afin de créer un excès de trous. Dans l'exemple du silicium, on inclura un atome trivalent (colonne III du tableau périodique), généralement un atome de bore. Cet atome n'ayant que trois électrons de valence, il ne peut créer que trois liaisons covalentes avec ses quatre voisins créant ainsi un trou dans la structure, trou qui pourra être rempli par un électron donné par un atome de silicium voisin, déplaçant ainsi le trou. Quand le dopage est suffisant, le nombre de trous dépasse de loin le nombre d'électrons. Les trous sont alors des porteurs majoritaires et les électrons des porteurs minoritaires. La figure (1.2) donne un aperçu de ce qui se passe pour un cristal de silicium dans lequel on a introduit des atomes de bore qui possède cinq électrons sur la couche externe[11].

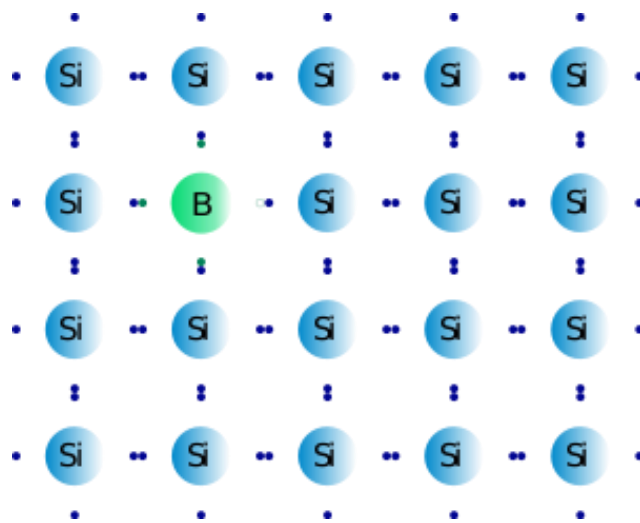


Figure 1.2 Silicium dopé au Bore[11].

1.4 Les équations fondamentales

1.4.1 Equation de Poisson

L'équation de Poisson s'exprime par :

$$\text{div} (\epsilon \nabla \psi) = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (1.1)$$

Où ψ représente le potentiel électrostatique, la permittivité électrique ($\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, ϵ_0 est la permittivité du vide et ϵ_r est la permittivité relative du matériau), ρ est la densité volumique nette de charges libres. Le champ électrique est donné par la relation :

$$\vec{E} = -\overrightarrow{\text{grad}} (\psi) \quad (1.2)$$

1.4.2 Equation de continuité

Pour les trous et les électrons, l'équation est :

$$\frac{1}{\rho} \text{div}(\vec{J}_p) = -\frac{\partial p}{\partial t} + G - R_p \quad (1.3)$$

$$-\frac{1}{\rho} \text{div}(\vec{J}_n) = -\frac{\partial n}{\partial t} + G - R_n \quad (1.4)$$

Où p représente la concentration en trous, n la concentration en électrons, j_p le courant des trous, j_n le courant des électrons), G le taux de génération, et R le taux de recombinaison et e la valeur absolue de la charge élémentaire. Le taux de génération représente la création d'une paire électron-trou pouvant provenir de l'absorption de la lumière. Le taux de recombinaison peut provenir soit d'une recombinaison assistée par les pièges (Shockley-Read Hall) ou soit d'une autre recombinaison [13].

1.4.1 Equations de transport

Dans le cas des hypothèses de base des équations de la physique des semi-conducteurs (le champ magnétique extérieur est nul, la température est uniforme dans toute la structure) les causes de l'apparition des courants électriques sont le champ électrique et le gradient des concentrations des porteurs de charge. Les courants déterminés par le champ électrique s'appellent courant du champ ou courant de drift. Et les courants déterminés par le gradient de concentration des porteurs s'appellent courant de diffusion [1].

Dans le cas hors équilibre thermodynamique, nous définissons deux quasi-niveaux de Fermi, un pour les électrons et un pour les trous, n et p qui expriment la modification de la probabilité d'occupation des états. Ainsi les densités des courants des équations de continuité peuvent être approximées à l'aide de la théorie de transport de Boltzmann par le modèle de drift-diffusion (modèle iso thermique de transport), les densités de courants sont exprimées en fonction des quasi-niveaux de Fermi par les expressions :

$$\vec{J}_n = -q\mu_n n \nabla \psi_n \quad (1.5)$$

$$\vec{J}_p = -q\mu_p p \nabla \psi_p \quad (1.6)$$

Avec q est la charge électrique, μ_n et μ_p sont les mobilités des électrons et des trous.

Les expressions pour les concentrations des électrons et des trous sont:

$$n = n_{ie} \exp\left[\frac{q(\psi - \psi_n)}{kT}\right] \quad (1.7)$$

$$p = n_{ie} \exp\left[\frac{q(\psi - q_p)}{KT}\right] \quad (1.8)$$

Avec n_{ie} la densité effective intrinsèque.

En introduisant ces équations dans les expressions de densité de courant, on obtient:

$$J_n = qD_n \nabla_n - q_n \mu_n \nabla \psi - \mu_n p [KT(\ln n_{ie})] \quad (1.9)$$

$$J_p = -qD_p \nabla_p - q_p \mu_p \nabla \psi - \mu_p p [KT(\ln n_{ie})] \quad (1.10)$$

Avec D_n et D_p sont les coefficients d'Einstein qui ont pour expression:

$$D_n = \frac{KT}{q} \mu_n \quad (1.11)$$

$$D_p = \frac{KT}{q} \mu_p \quad (1.12)$$

a Diffusion

Les courants de diffusion sont générés par l'existence d'une concentration non uniforme des électrons ou des trous dans le semi-conducteur. Il est nettement plus probable qu'une charge d'une zone de concentration élevée se déplace vers une zone de basse concentration que l'inverse. Ce phénomène de diffusion est décrit quantitativement par la première loi de Fick qui montre la proportionnalité. Entre le flux de particules et le gradient de leur concentration C selon la relation :

$$\vec{F} = -D \cdot \vec{\nabla} C \quad (1.13)$$

Le facteur de proportionnalité D s'appelle coefficient de diffusion. En appliquant la relation (1. 13) pour les électrons ($C=n$, $D=D_n$) et les trous ($C=p$, $D=D_p$) nous trouvons les densités des courants de diffusion :

$$\overrightarrow{J_{ndiff}} = -q \overrightarrow{F_n} = q D_n \nabla_n \quad (1.14)$$

$$\overrightarrow{J_{pdiff}} = -q \overrightarrow{F_p} = q D_p \nabla_p \quad (1.15)$$

Qui représente en pratique le premier terme des équations (1. 14) et (1. 15).

Notons que le troisième terme des équations (1. 14) et (1. 15) est aussi un courant de diffusion. Mais il est dû au gradient des densités effectives d'états n_{ie} .

b Dérive

En présence d'un champ électrique le porteur de charge est accéléré entre deux collisions aléatoires. La direction est donnée par le champ électrique et génère un déplacement moyen avec une vitesse donnée par :

$$\vec{v}_n = -\mu_p \cdot \vec{E} \text{ pour les électrons} \quad (1.16)$$

$$\vec{v}_p = \mu_p \cdot \vec{E} \text{ pour les trous} \quad (1.17)$$

Dans les mêmes conditions de champ, les vitesses des électrons sont plus grandes que celle des trous. Donc nous avons beaucoup plus de chance de collecter des électrons que des trous.

Le courant de drift est donné par :

$$\vec{J}_{ndiff} = -qn\vec{V}_n \quad (1.18)$$

$$\vec{J}_{pdiff} = qn\vec{V}_p \quad (1.19)$$

Ainsi le courant de drift est représenté dans le second terme des équations (1.18) et (1.19).

Equations de continuité. Les équations de continuité décrivent la vitesse de variation en fonction du temps des concentrations des porteurs. Les causes de la variation des concentrations des trous ou des électrons sont :

Les générations dues aux agents externes (qui sont souvent la création de paires électron-trou). Les générations-recombinaisons internes. Les phénomènes de transport (par la présence des courants de conduction ou diffusion).

L'équation de continuité s'exprime par :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_p + \vec{G}_p - R_p \quad (1.20)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n + \vec{G}_n - R_n \quad (1.21)$$

G_n et G_p sont les taux de génération pour les électrons et les trous par des agents externes, R_n et R_p sont respectivement les taux de recombinaisons (internes) pour les électrons et les trous, J_n et J_p sont les densités des courants des électrons et des trous.

1.5 La jonction PN

1.5.1 Principe (jonction PN à l'équilibre)

Les électrons majoritaires du côté "N"

" ont tendance à diffuser du côté "P", où ils sont minoritaires. Quand un électron arrive du côté "P", il se recombine avec un trou, et, en disparaissant, il laisse du côté "N" un atome donneur ionisé positivement non compensé électriquement[3].

Les trous majoritaires du côté "P" ont tendance à diffuser du côté "N" où ils sont minoritaires. Quand un trou arrive du côté "N", il se recombine avec un électron libre, et, en disparaissant, il laisse du côté "P" un atome accepteur ionisé négativement non compensé électriquement[3].

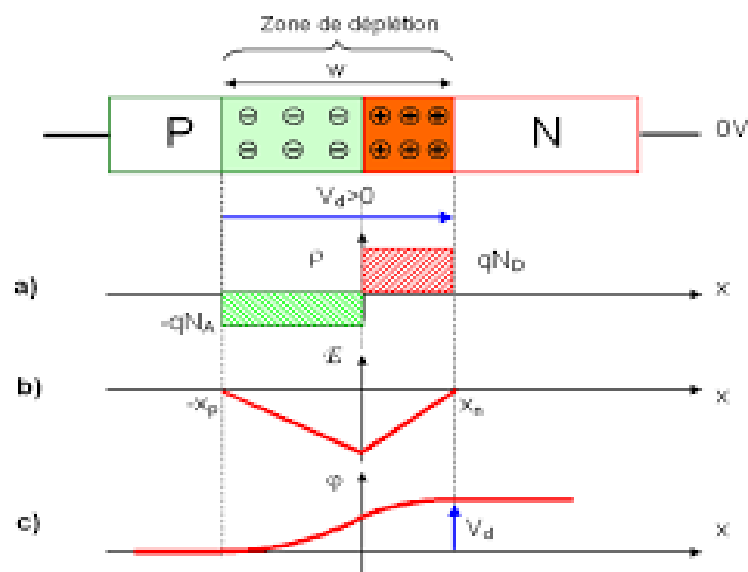


Figure 1.3 jonction PN à l'équilibre.

1.6 Polarisation de la jonction PN

1.6.1 Polarisation en inverse

Quand la jonction est polarisée en inverse, c'est-à-dire quand on applique une tension V positive du côté N alors que le côté P est négatif (masse), elle s'ajoute au potentiel électrostatique interne (V_{bi}) et la barrière de potentiel devient infranchissable pour les porteurs majoritaires, seuls les porteurs minoritaires peuvent diffuser. Cela montre qu'à l'instant où le circuit est fermé, une partie des électrons se libère de la zone N du cristal et se dirige vers le pôle positif de l'alimentation. Un certain nombre de porteurs minoritaires réussit toujours à traverser la jonction provoquant ainsi un remplacement partiel des électrons libres dans la zone N et des trous dans la zone P (figure 1.4). On constate donc la présence d'un courant très faible circule de l'extrémité N à extrémité P du cristal, ce courant est appelé courant inverse. Ce mode de fonctionnement en inverse est celui adopté pour le fonctionnement d'un détecteur silicium. [14].

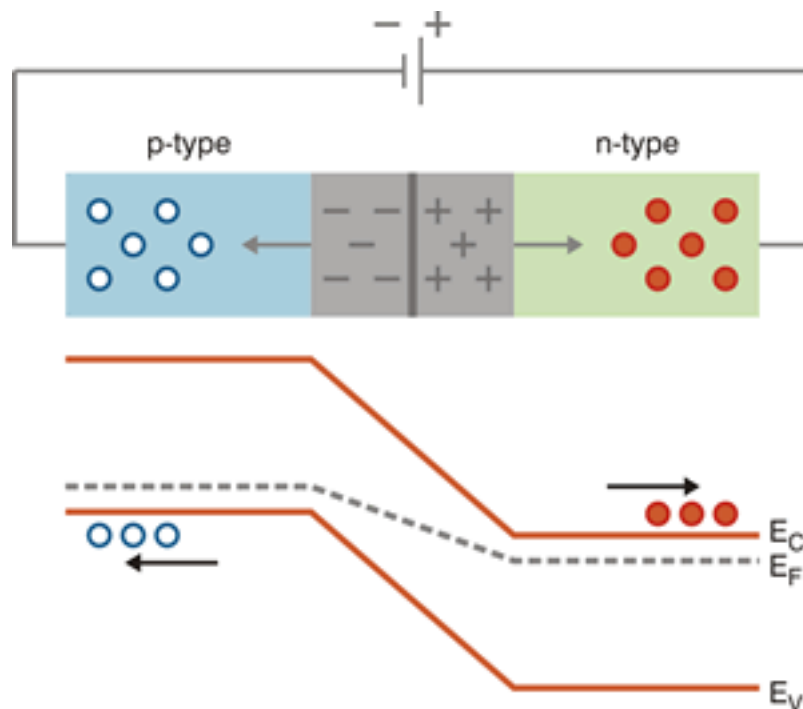


Figure 1.4 Jonction PN polarisée en inverse.

1.6.2 Déplétion totale de la zone de charge d'espace

La zone de déplétion, aussi appelée zone de charge d'espace (ZCE), ou zone désertée, correspond à la région qui apparaît dans une jonction P-N, entre la zone dopée N et la zone dopée P. Elle est appelée «zone de déplétion» ou «zone désertée» parce qu'elle est dépourvue de porteurs libres, et elle est appelée «zone de charge d'espace» parce qu'elle est constituée de deux zones chargées électriquement (contrairement au reste du semi-conducteur N et du semi-conducteur P qui sont globalement neutres)[4].

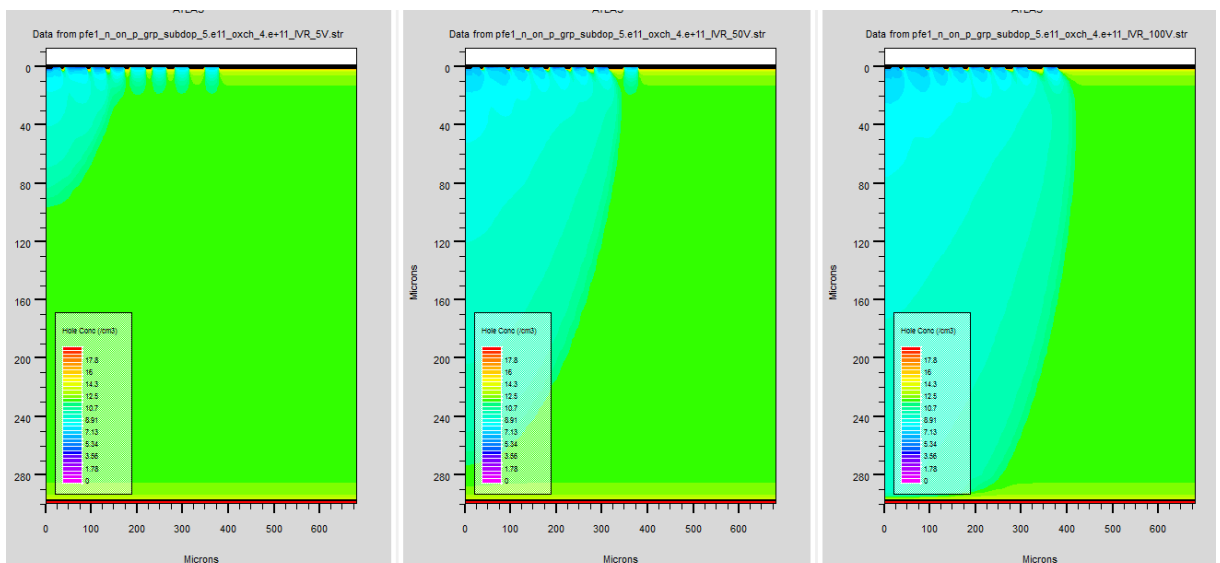


Figure 1.5 L'expansion de la zone charge d'espace pour différent tension de la structure n-on-p-GRP.

1.6.3 Phénomène de claquage

La tension V_i ne peut augmenter indéfiniment car il existe une limite à la valeur du champ électrique E_0 . En effet, lorsque le champ électrique augmente, la force électrique $F = -eE_0$ exercée sur les électrons liés augmente. Lorsque cette force est supérieure à la force de liaison des électrons de valence sur les noyaux, ces électrons sont libérés, le matériau devient conducteur et la tension V_i n'augmente plus. En d'autres termes, le champ électrique maximum que l'on peut établir dans un cristal semi-conducteur est celui qui provoque l'excitation directe d'un électron lié de la bande de valence vers un état libre de la bande de conduction, c'est-à-dire l'ionisation du matériau. Dans le silicium ce champ maximum est de l'ordre de 0.5 MV/cm [3]. Dans la jonction pn la tension limite correspondante est fonction de la largeur de la

zone de charge d'espace et par suite des dopages du semi-conducteur. La tension limite est appelée tension Zener V_z , l'effet de claquage de la jonction qui en résulte est appelé effet Zener. La paire électron-trou créée par l'ionisation est évacuée par le champ électrique et donne naissance à un courant inverse important. Le processus est représenté sur la Figure (1.6). L'électron est directement émis, par effet tunnel à travers la zone de charge d'espace, de la bande de valence de la région de type p vers la bande de conduction de la région de type n. La tension inverse ne peut augmenter au-delà de la tension de claquage $V_c = V_z$, la caractéristique $I(V)$ est représentée sur la Figure (1.6).

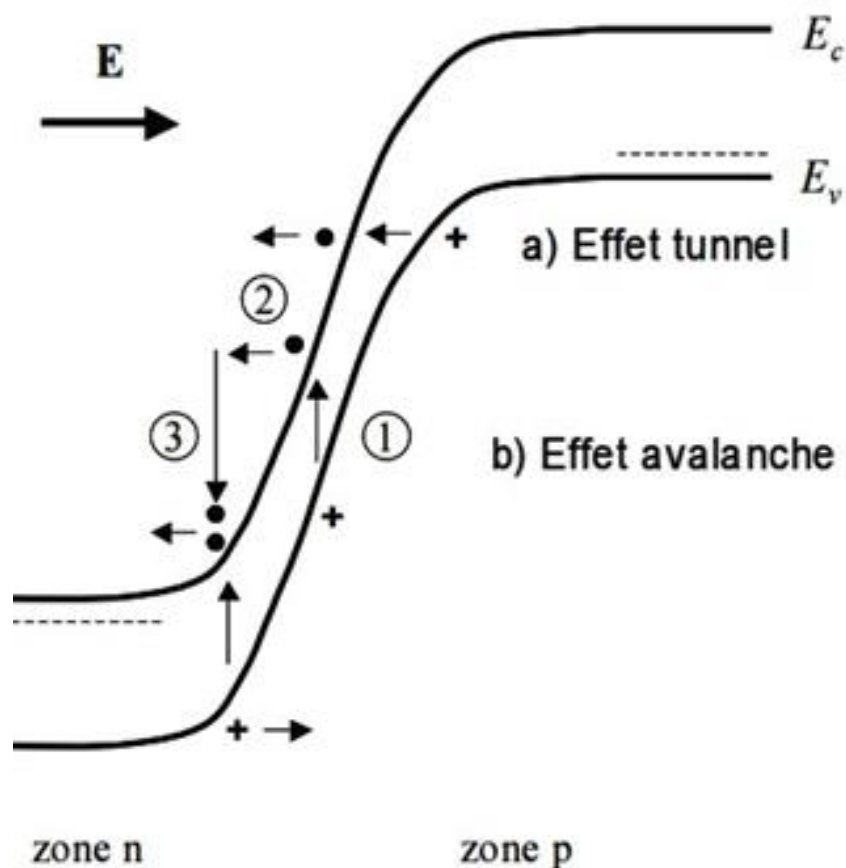


Figure 1.6 Claquage par avalanche.

Dans la pratique cet effet n'est observable que dans les jonctions pn fortement dopées, dans lesquelles la zone de charge d'espace est très étroite. Lorsque la zone de charge d'espace n'est pas particulièrement étroite, un autre phénomène entraîne le

claquage de la jonction, avant l'apparition de l'effet Zener, c'est l'effet d'avalanche. Le processus d'avalanche nécessite non seulement un champ élevé mais aussi une distance suffisante permettant l'accélération des porteurs, c'est la raison pour laquelle dans les jonctions très dopées l'effet Zener précède l'effet d'avalanche, car la zone de charge d'espace n'a pas une largeur suffisante, par contre dans la plupart des jonctions l'effet d'avalanche précède l'effet Zener car son champ de seuil est plus faible [2].

1.7 Détecteurs de particules à base de semi-conducteurs

Un détecteur au silicium est un dispositif basé sur les structures " p-i-p" ,"n-i-n" et " p-i-n" ou encore "n-i-p". La jonction " p-n" représente l'élément de base de la majorité des détecteurs qui sera présentée dans les sections suivantes avec plus de détail.

Le dopage peut être réalisé sélectivement sur différentes régions d'un même substrat de silicium ; une partie du cristal peut être dopé p et un autre n. Les deux types de silicium p et n peuvent être ainsi mis en contact. Comme ils présentent des concentrations des porteurs libres très différents, un phénomène de diffusion se met en place, les électrons en excès du côté n migrent vers le côté p alors que les trous se déplacent en sens opposé. Ce mouvement des porteurs tend à équilibrer la concentration de chaque type de porteur libre. Les électrons qui quittent le côté n et les trous qui quittent le côté p, ne sont pas remplacés ce qui entraîne la formation d'une charge d'espace. Celle-ci génère alors un champ électrique qui s'oppose à la diffusion des porteurs de charge libres. Un équilibre s'établit lorsque le courant induit par ce champ compense celui dû à la diffusion. Dans la région proche de l'interface entre les côtés p et n, pratiquement aucune charge libre n'est présente. Une jonction p-n dont le principe est représenté sur la figure 1.4 est alors formée [5].

1.7.1 Les détecteurs de particules au silicium (Si)

Les détecteurs de particules à base de semi-conducteurs sont employés depuis 1964 et ils fournissent la meilleure résolution de l'énergie. Ils donnent également une impulsion d'une amplitude plus élevée [2].

a Principe

Les détecteurs à semi-conducteurs fonctionnent en principe comme une chambre d'ionisation solide, c'est-à-dire que les porteurs de charges positifs et négatifs sont créés dans les détecteurs par ionisation du matériau. Ces porteurs de charges migrent vers les électrodes sous l'action du champ électrique régnant entre ces électrodes et créent une impulsion de courant dont l'amplitude est proportionnelle au nombre de porteurs de charges libérés et ainsi à l'énergie. La différence par rapport à la chambre d'ionisation se trouve dans le fait que:

Le détecteur est un solide et de ce fait les portées des particules chargées sont plus petites pour une même énergie, les interactions avec les atomes étant nombreuses. Les porteurs de charges ne se composent pas d'électrons et d'ions comme dans la chambre d'ionisation à gaz, mais d'électrons et de trous de masse très proches. Les avantages sont les suivants:

L'énergie nécessaire à la libération d'un électron dans le détecteur gazeux s'élève à environ 30 eV et elle est seulement de 3.6 eV pour une paire électron-trou.

Les temps de collection des porteurs de charges sont courts à cause des faibles dimensions du détecteur, ce qui entraîne la formation d'impulsions rapides. Cependant, la zone utile à la détection reste la zone de déplétion de la jonction PN, désertée de porteurs libres qui pourraient se recombiner avec les porteurs créés par l'ionisation. L'accroissement du volume utile du détecteur est obtenu par l'élargissement de la zone de déplétion ce qui amène à polariser la jonction avec une tension inverse plus importante tout en restant inférieure cependant à la tension de claquage. La zone de déplétion dans la jonction est le milieu de détection des radiations, en d'autres termes c'est la région active. Les particules chargées incidentes sur le détecteur créent des porteurs de charge (paires électron-trou) Figure (1.8) [5].

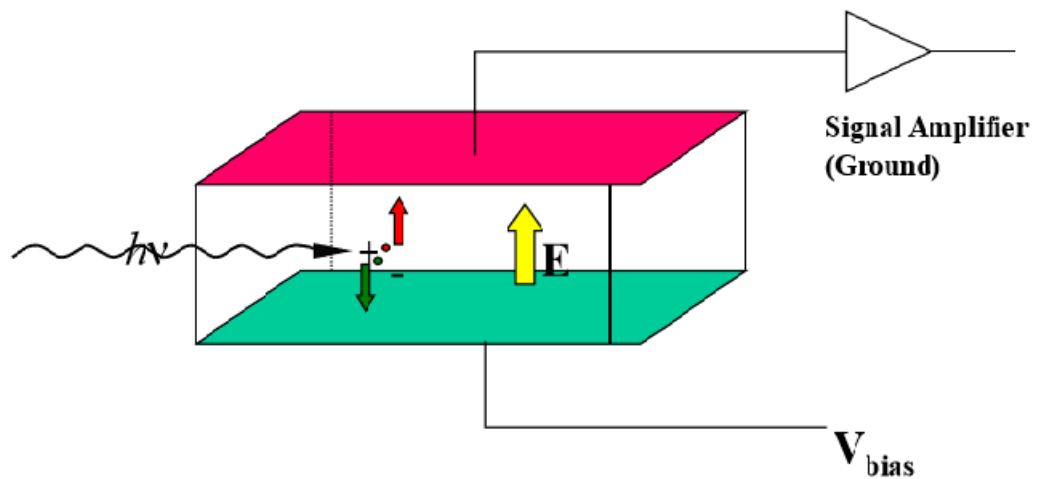


Figure1.7 Principe de fonctionnement d'un détecteur a jonction semi-conductrice.

1.7.2 Différents types de détecteurs

a Microstrip

Un détecteur de micro rupteur est un détecteur de particules conçu pour consister en un grand nombre de composants identiques disposés selon un axe d'une structure bidimensionnelle, 'généralement par lithographie. L'idée est que plusieurs composants réagiront à une seule particule qui passe, permettant une reconstruction précise de la piste de la particule.

Détecteurs de micro ruban en silicium, dans lesquels le mécanisme de détection est la production de paires électron-trou dans une couche de silicium de 300 micromètres, les électrons étant alors attirés par un champ électrique créé par un modèle d'anodes inter digitées et de cathodes à la surface de la Le silicium séparé par un isolant SiO₂ est un design commun[8].

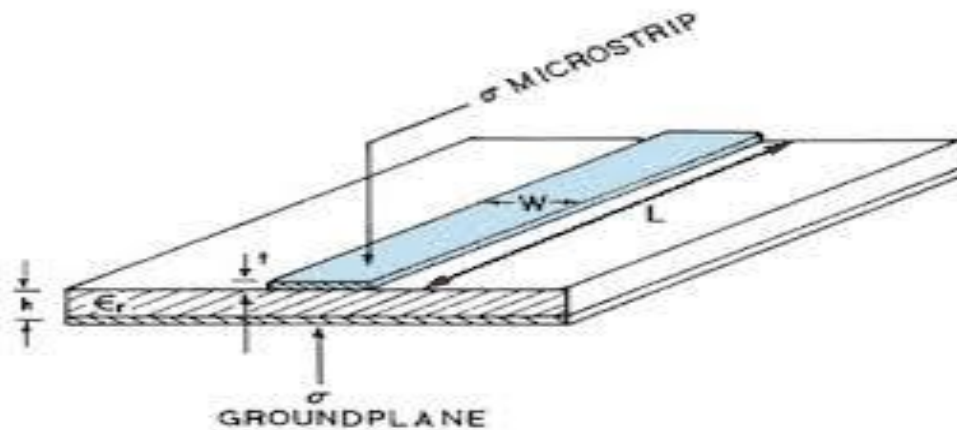


Figure 1.8 Représentation schématique d'un détecteur microstrip.

b Planaire

La recherche de procédés permettant de fabriquer, de manière contrôlée et reproductible, des détecteurs à base de silicium de plus en plus performants a naturellement conduit à envisager l'utilisation des méthodes exploitées dans l'industrie des circuits intégrés. Le développement de procédés du type planaire, la passivation de la surface par l'oxyde SiO₂, l'emploi d'anneaux de garde et la formation de la fenêtres d'entrée minces ont constitué les premiers essais d'adaptation de ces technique.

Le procédé planaire est largement utilisé à l'heure actuelle pour préparer sur le silicium divers types de détecteurs, allant des dispositifs conventionnels (jonction p-n individuelle de quelques centimètres carrés), jusqu'à des structures originales, que seule la mise en œuvre de techniques sophistiquées a permis d'envisager. C'est en particulier le cas de détecteurs à localisation résultant de la segmentation des contacts jusqu'à des dimensions de quelques micromètres [8].

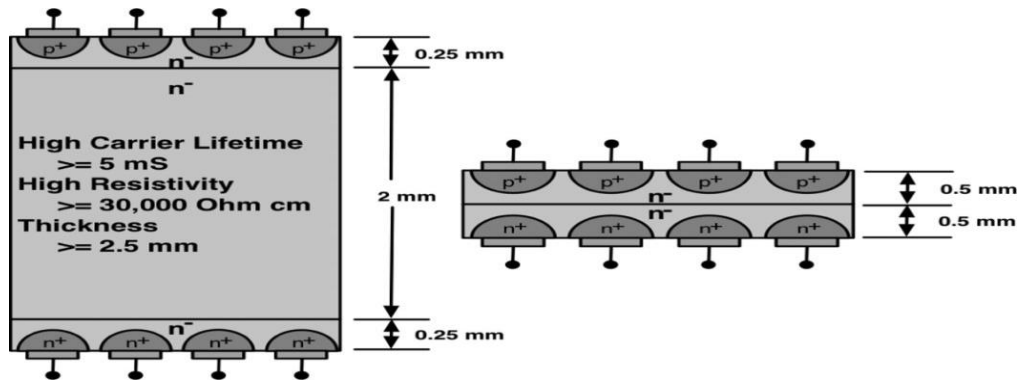


Figure 1.9 Représentation schématique d'un détecteur planaire.

3D

Les détecteurs 3D ont été proposés pour la première fois en 1995 par Sherwood Parker de l'université Hawaïi et ses collègues (figure 1.10).

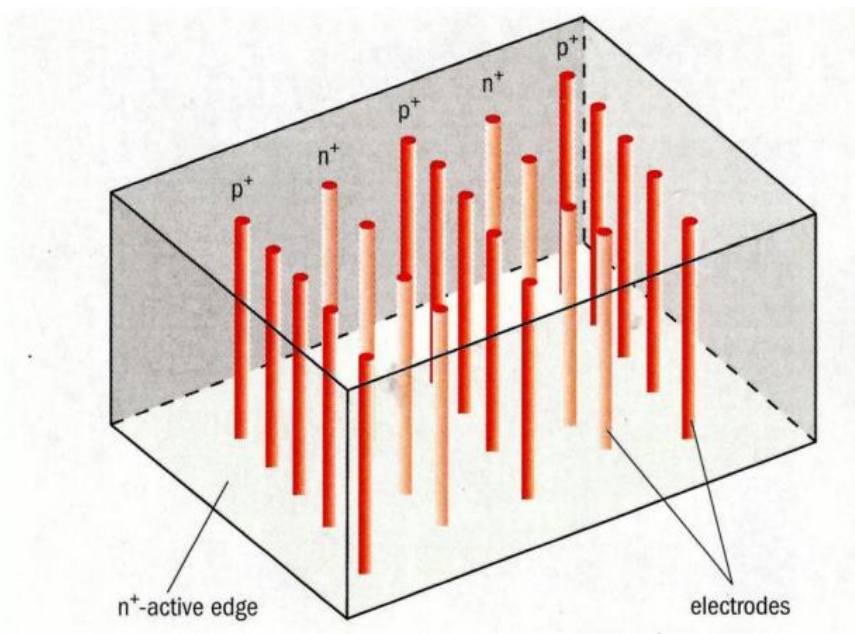


Figure 1.10 Représentation schématique d'un détecteur 3D.

La différence de la technologie 3D par rapport à la technologie planaire traditionnelle est que le champ électrique est parallèle par rapport à la surface du détecteur. De ce fait, l'avantage majeure est que la distance de collection des charges est plusieurs fois inférieure, donc un temps de collection considérablement plus rapide et une valeur de la tension nécessaire pour étendre le champ électrique dans tout le volume est plus petite que celle de la technologie planaire.

1.8 Effet des radiations sur les détecteurs

1.8.1 En surface

Le terme effets de surface regroupe l'ensemble des défauts créés dans les couches de passivation, généralement les couches de dioxyde de silicium et ses interfaces Si-SiO₂. Mis à part la différence de localisation, les effets de substrat et de surface se distinguent par leur origine. Ces mêmes interactions sont dommageables dans un isolant. Cette différence est simplement due au fait que les porteurs de charge ont une grande mobilité dans un semi-conducteur rendent les effets transitoires. Au contraire, dans les couches de SiO₂, dont la structure du réseau est amorphe, ils peuvent être bien moins mobiles et se retrouvent souvent piégés. La figure 1.11 représentant les différents effets de surface qui interviennent suite à une interaction ionisante dans la couche SiO₂. L'électron et le trou créés par l'interaction d'une particule dans la couche de SiO₂ sont sur deux niveaux d'énergie distincts. Le mécanisme de transport de l'électron est dessiné en rouge et celui du trou en bleu.

Les effets d'interfaces sont représentés par une accumulation de porteurs de charge positive dans le dioxyde de silicium proche de l'interface avec le silicium. Cette accumulation crée une couche d'inversion dans le silicium (représentée par une concentration de porteur de charge négative)[13] qui peut provoquer un court-circuit entre deux pixels adjacents.

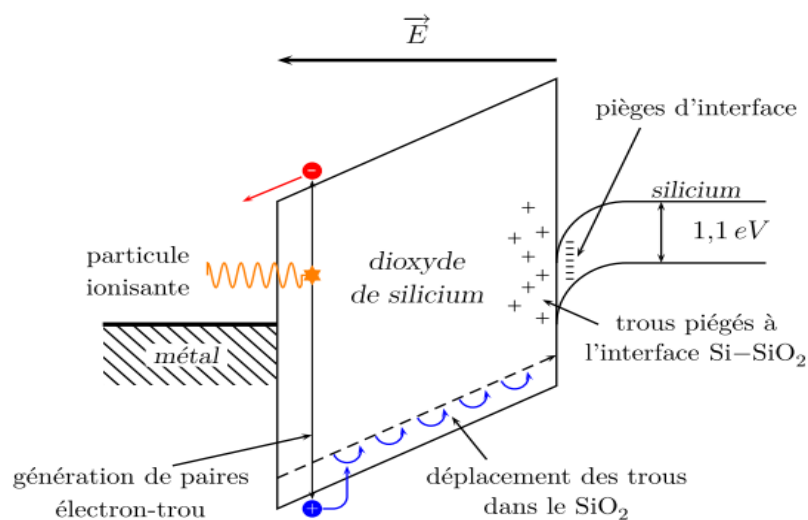


Figure 1.11 Représentation schématique des effets de surface.

Pour remédier à cette problématique, il existe trois solutions qui empêchent l'inversion de la couche de surface. On les appelle souvent: les techniques d'isolement de surface: (i) P-spray, (ii) p-stop et (iii) p-spray modérée.

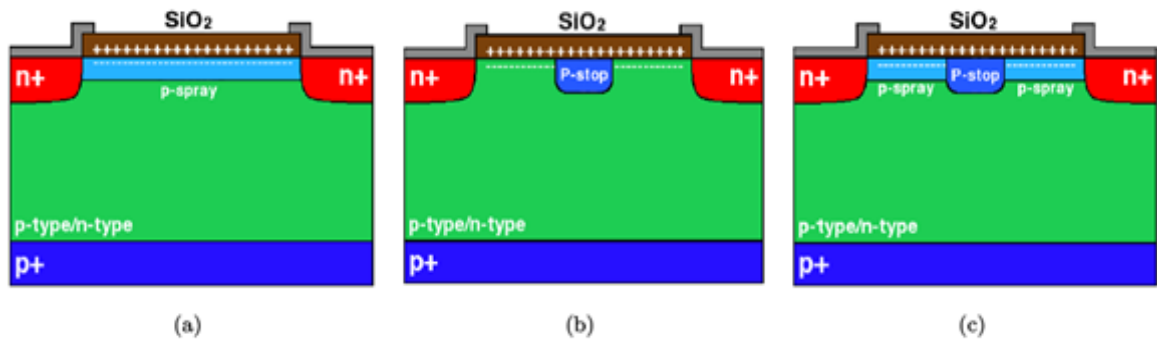


Figure 1.12 Différentes techniques d'isolement en surface. a) p-spray, b) p-stop et c) p-spray modérée.

a P-spray

Cette solution consiste à implanter un dopant de type p+ avec dose moyenne sur le côté de lecture de la plaquette comme le montre la figure 1.12.a. Le résultat obtenu est la compensation de la couche d'électrons qui s'est formée en surface.

Les principaux inconvénients de cette technique sont liés à une tension de claquage assez faible avant l'irradiation, causée par la concentration de dopage accrue de la région p+ en contact avec les électrodes n+ par le fait que le potentiel de p-spray aura tendance à suivre le potentiel du substrat,. Lorsque les dispositifs subissent une irradiation, la concentration totale de charge d'oxyde augmente et le dopage efficace de la couche de p-spray est réduit. Cela entraîne des tensions de rupture plus importantes et des capacités inter-électrodes inférieures après irradiation. Malheureusement, si la dose implantée n'est pas suffisante ou si les niveaux d'irradiation prévus sont surmontés, l'isolement entre les électrodes ne peut être assuré.

b P-stop:

Cette solution est destinée à interrompre la continuité de la couche d'électrons qui s'est formée en surface avec des implants de type p+ avec des doses élevées localisés tout autour des électrodes de lecture. Cette approche est illustrée sur la figure 1.12.b. La meilleure implémentation géométrique de p-stop est d'avoir des implants étroits, afin de limiter son couplage avec la polarisation du substrat et donc d'augmenter la tension de claquage. Dans ce cas particulier, la couche d'électrons de surface est en contact direct, sur une extrémité, avec les jonctions n+. À l'autre extrémité, la couche d'électrons est en contact direct avec un implant p+ à forte concentration. La tension de claquage de p-stop est généralement élevée avant l'irradiation mais dès que la charge d'oxyde augmente, elle commence à diminuer. Le principal avantage de p-stop par rapport p-spray est l'isolement certain entre les électrodes.

c p-spray modérée

Cette solution est une combinaison entre les deux solutions précédentes comme le montre la figure 1.12.c.

1.8.2 En volume

Les dommages en volume produits dans les détecteurs de particules au silicium par les hadrons (neutrons, protons) sont provoqués par le déplacement des atomes suivant de coups primaires sur ses derniers (PKA)² lors de son déplacement dans le réseau. Le résultat est un silicium interstitiel qui laisse un site vacant (paire de Frenkel) (figure 1.13).

Tous les deux émigrent par le réseau et forment finalement des défauts ponctuels avec les atomes d'impureté (dopant). Cependant, l'atome primaire de recul peut seulement être déplacé si l'énergie donnée est plus forte que l'énergie E_d de seuil de déplacement de 25 eV approximativement [2].

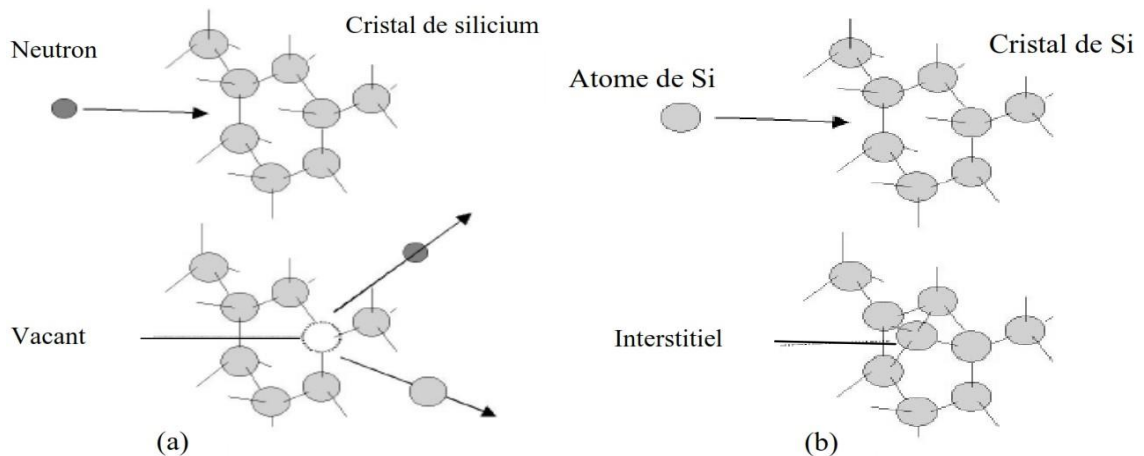


Figure 1.13 a) Formation du vacant due au déplacement d'atome silicium, b) formation des interstitiels due aux réarrangements après dispersion.

À l'extrémité du chemin de recul de PKA, des agglomérations denses de défaut sont formées, ayant pour résultat des régions désordonnées habituellement référées comme des clusters. Les défauts les plus importants créés par l'irradiation le divacant (V_2) et le complexe $C_i O_i$ à cause de leurs taux d'introduction élevés et proximité relative au milieu de gap d'énergie. Ces deux défauts jouent un rôle important en déterminant le comportement macroscopique des dispositifs endommagés. Les neutrons sont plus pénétrants que les particules chargées (avoir besoin d'une énergie cinétique ≈ 185 eV pour la production d'une paire Frenkel et plus que 35 keV pour produire un cluster), et agissent principalement sur la majeure partie du dispositif[2].

1.9 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons passé en revue les notions de base relatives à la physique des composants semi-conducteurs principalement les équations fondamentales qui régissent les mécanismes de conduction dans une jonction PN. Par la suite, nous avons passé en revue quelques détecteurs à semi-conducteurs les plus importants. Enfin, nous avons décrit les défauts dans le solide et les dommages et les défauts induits suite à des radiations ionisantes dans le silicium

Chapitre 2 logiciel de simulation Silvaco

2.1 Introduction

Dans notre travail nous avons utilisé un logiciel de simulation technologique, pour simuler les caractéristiques électriques de détecteur particulier à base de silicium, mais il faut tout d'abord connaître quelques notions principales sur la simulation en générale et ce logiciel en particulier.

2.2 Le rôle de la simulation

La simulation fournit un lien entre le monde expérimental et le monde théorique comme le montre la figure 2.1. Elle complète la théorie et l'expérimental et construit la réalité physique dans la présence de certaines contraintes ou bien la présence d'une analyse mathématique impossible [9].

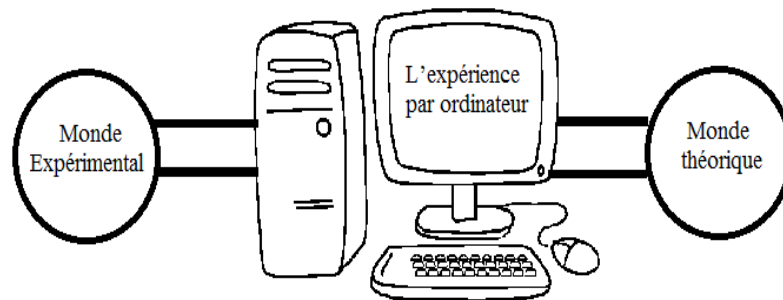


Figure2.1 Le rôle de la simulation.

2.3 TCAD Silvaco

SILVACO «Silicon Valley Corporation» est une société américaine, ayant son siège à Santa Clara en Californie. Elle est une des principales fournisseurs de chaines professionnelles de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technology Computer Aided Design). Ces outils sont employés par les compagnies de microélectronique dans le domaine de la recherche, du développement et de la conception de dispositifs.

Historiquement le TCAD-SILVACO a été fondé en 1984 par le Dr. Ivan Pesic qui a exposé les outils d'extraction des paramètres d'une structure UTMOs et pour répondre aux besoins des designers de circuits intégrés (IC, integrated circuits) analogiques pour des modèles SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) de plus en plus précises et linéaires.

L'entrée de SILVACO dans la technologie a eu lieu en 1989, et elle a été basée sur une recherche du Département des Dispositifs Physiques de l'Université de Stanford, ainsi apparaissent dans SILVACO « Athena » comme simulateur des processus et « Atlas » comme simulateur des dispositifs (2D et 3D).

Aujourd'hui ce logiciel est très utile dans le développement de beaucoup de projets de recherches. SILVACO inclut de nouveaux modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces. SILVACO n'a pas été conçu pour répondre à un seul composant semi-conducteur. En incluant des modèles plus généraux de la physique des semi-conducteurs, il permet des simulations plus étendues en balayant toute une gamme de composants électroniques.[1]

2.4 Logiciel de simulation « Silvaco-Atlas »

La figure 2.2 montre l'environnement de fabrication virtuel des plaquettes du logiciel « SILVACO ». Il est constitué de '7' programmes parmi lesquelles on a utilisé le logiciel « Atlas » qui permet la simulation, en deux et trois dimensions, des dispositifs électroniques à semi-conducteurs [10].

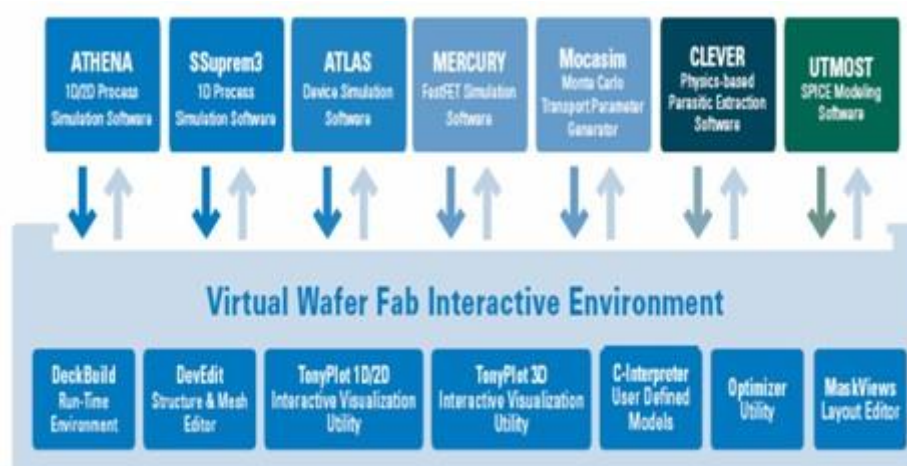


Figure 2.2 Environnement virtuel de fabrication des plaquettes de Silvaco

[8].

La Figure (2.3) montre les entrées et les sorties du logiciel «Atlas » dont l'environnement d'exécution «DeckBuild» reçoit les fichiers d'entrée, dans lesquelles «Silvaco-Atlas » a été appelé à exécuter le code, et « TonyPlot » a été utilisé pour afficher et visualiser la sortie de la simulation.

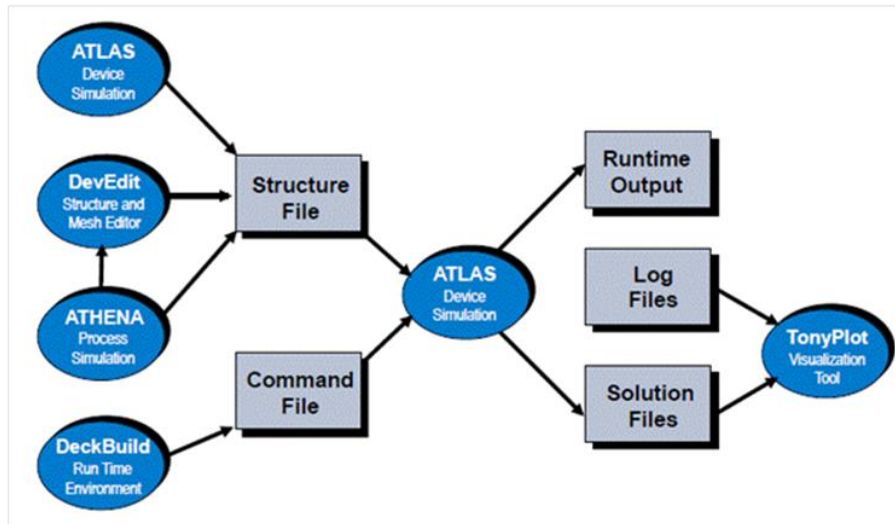


Figure2.3 L'environnement ATLAS [10].

2.5 Présentation d'atlas

La capacité à simuler avec précision un dispositif semi-conducteur est cruciale pour l'industrie et milieux de recherche. L'outil de simulation ATLAS est spécialement conçu pour la modélisation 2D et 3D de composants basés sur la physique des semi-conducteurs, en incluant les propriétés électriques, optiques et thermiques. Il possède une bibliothèque regroupant des matériaux prédéfinis comme il permet à l'utilisateur de définir d'autres matériaux propre à leur choix.

Le schéma de la figure 2.3 représente les différents types d'informations qui circulent en entrée et en sortie « d'Atlas ». La plupart des simulations réalisées sous « Atlas » utilisent deux fichiers d'entrée. Le premier fichier est un fichier texte contenant les commandes pour qu'Atlas s'exécute (représenté par « Fichier de commande »). Le second fichier est un fichier «de structure » contenant la structure du dispositif qui va être simulée définie dans «Athena » ou « DevEdit ». A la sortie « d'Atlas », nous avons trois types de fichiers.

Le premier de ces fichiers est la sortie « Runtime » qui donne la progression, les

erreurs et les messages d'avertissements pendant la simulation. Le deuxième type de fichier est le fichier « log » qui stocke toutes les valeurs de tensions et des courants provenant de l'analyse du dispositif simulé (c'est le fichier du comportement électrique). Le troisième fichier de sortie est le « Fichier de solution », ce fichier stocke les données 2D ou 3D concernant les valeurs des variables solutions en un point donné du dispositif (c'est le fichier physique, il contient la structure dans un état particulier). Les deux derniers fichiers sont traités par l'outil de visualisation « TonyPlot ».[10]

2.6 Ordres de commandes d'Atlas

Après la présentation de l'outil de simulation « d'Atlas » de SILVACO TCAD, sa composition interne et son fonctionnement nous allons maintenant présenter l'ordre des commandes propres à la logique de programmation « d'Atlas ». Ainsi il existe cinq groupes de commandes, ces groupes doivent être organisés correctement (Tableau 2.1). Si l'ordre n'est pas respecté, un message d'erreur apparaît et le programme ne s'exécute pas d'une façon correcte. Par exemple, si les paramètres ou les modèles de matériaux ne sont pas placés dans l'ordre idoine, le simulateur ne les prend pas en compte [1].

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

Tableau 2.1 Les différents groupes d'ATLAS avec leurs commandes.

2.6.1 Spécification de la structure

Silvaco Atlas reçoit les fichiers d'entrée qui contiennent les programmes de simulation de DeckBuilt. Atlas est appelé à exécuter ces derniers par la commande suivante :

GO ATLAS

Le format des commandes d'Atlas est le suivant :

< STATEMENT><PARAMETER>=<VALUE>

Exemple:

DOPING UNIFORM N.TYPE CONCENTRATION=1.0e16 REGION=1\OUTFILE=my.dop

Il existe quatre types de paramètres: réel, entier, caractère et logique. L'anti slash (\) indique la continuité de la commande dans la ligne suivante. Le paramètre UNIFORM est logique, il prend une valeur par défaut lorsqu'aucune valeur ne lui est attribuée. Il faut consulter le manuel de Silvaco Atlas pour identifier les valeurs par défaut assignées aux paramètres spécifiés. La spécification de la structure est obtenue par identification du maillage, des régions, des électrodes et du dopage.

a **Maillage**

Définir un bon maillage est l'un des plus cruciaux problèmes dans la simulation physique des composants semi-conducteurs. Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bonnes simulations. Celui-ci doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats. Le maillage adopté dans notre travail est bidimensionnel. Par conséquent on définit seulement les paramètres x et y. Le maillage est une série de lignes horizontales et verticales espacées entre elles. La syntaxe du maillage est :

MESH space.mult=<value>

X.MESH location=<value> spacing=<value>

Y.MESH location=<value> spacing=<value>

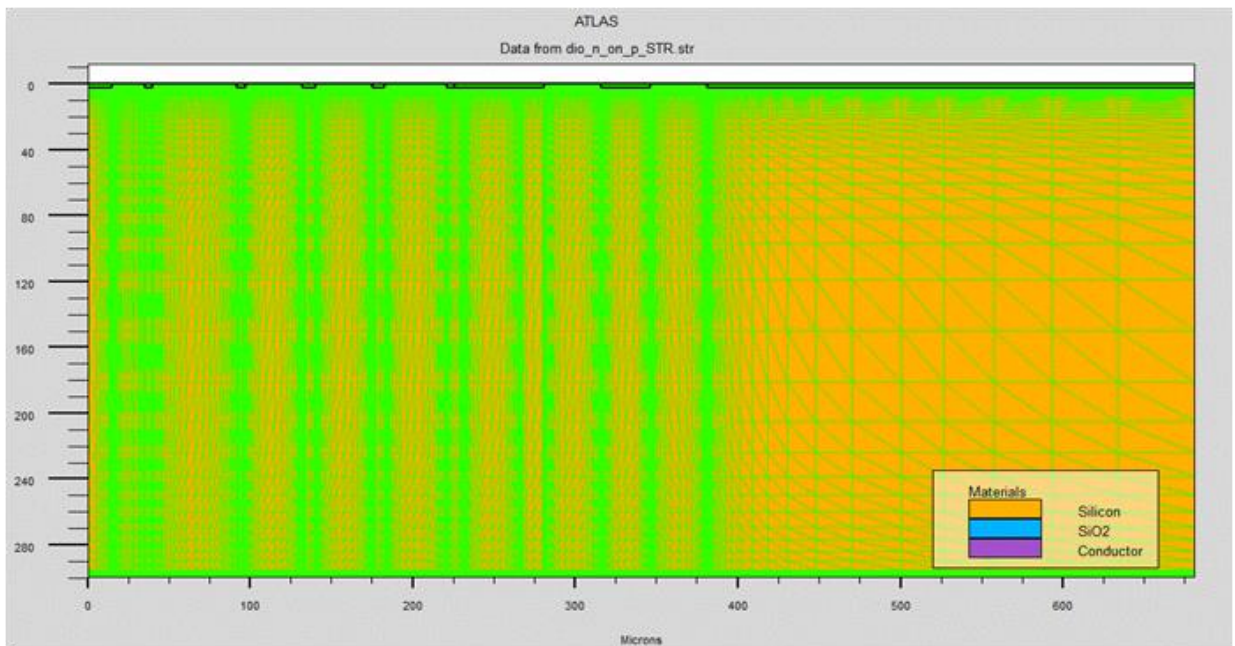


Figure2.4 Représentation du maillage d'une structure avec Atlas.
b Régions

Après avoir défini le maillage, il est nécessaire de définir les régions dont le format de définition des régions est le suivant:

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

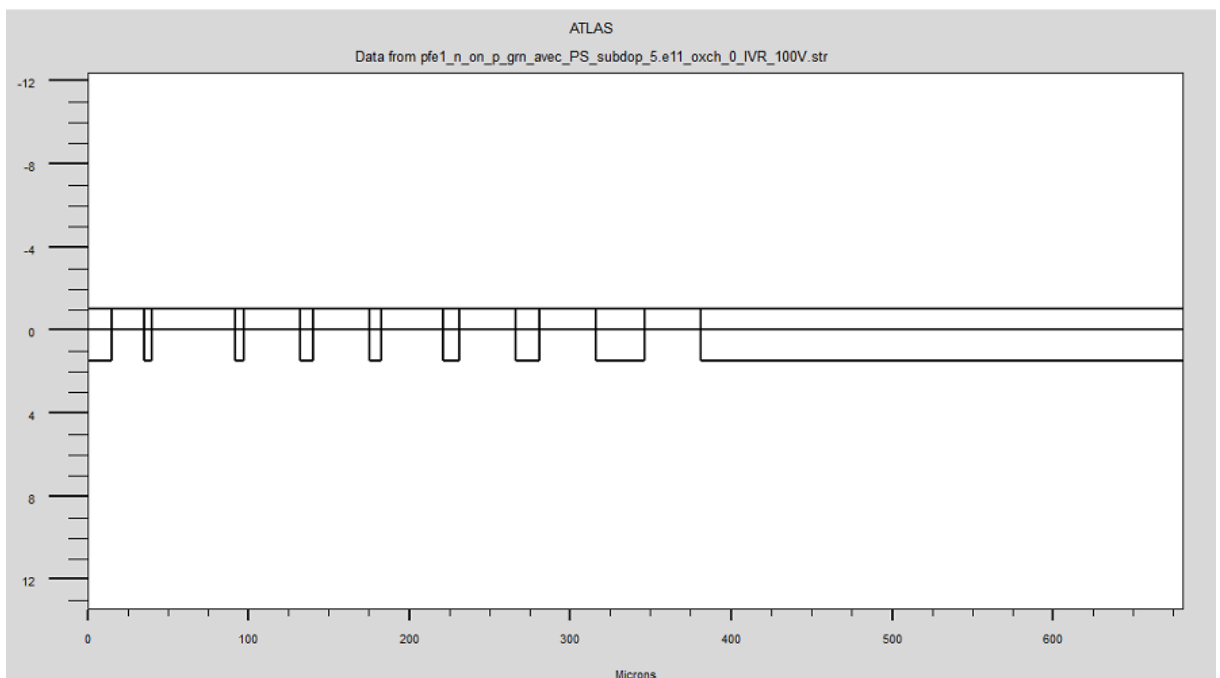


Figure2.5 Définition des régions avec Atlas.

c Electrodes

« Atlas » a une limite de 50 électrodes qui peuvent être définies. Typiquement dans notre simulation, il n'y a que deux électrodes, l'anode et la cathode. Le format de définition des électrodes est comme suit:

ELECTRODE name=<electrode name><position_parameters>

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).[10]

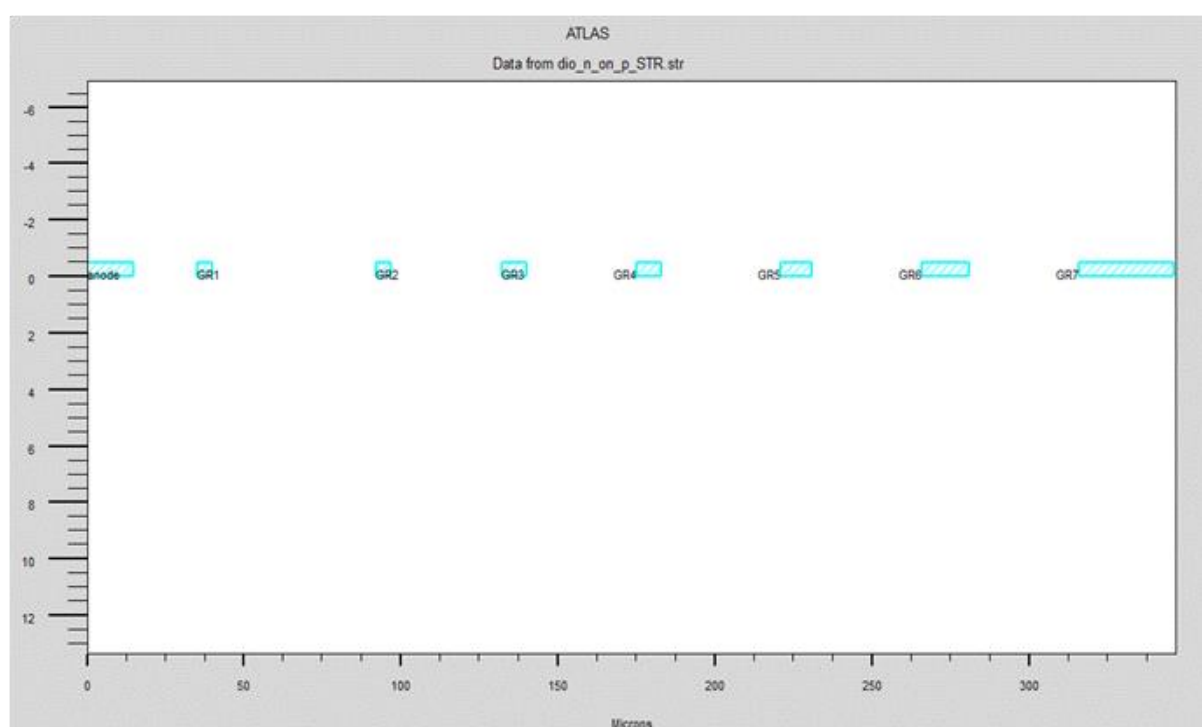


Figure2.6 Définition des électrodes avec Atlas.

d Dopage

Le dernier aspect de la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage.

Le format de la déclaration de dopage dans « Atlas » se présente comme suit:

DOPING <distribution type><dopant type><position parameters >

Le dopage peut être de type N ou P. Le type de distribution peut être uniforme ou

gaussienne.

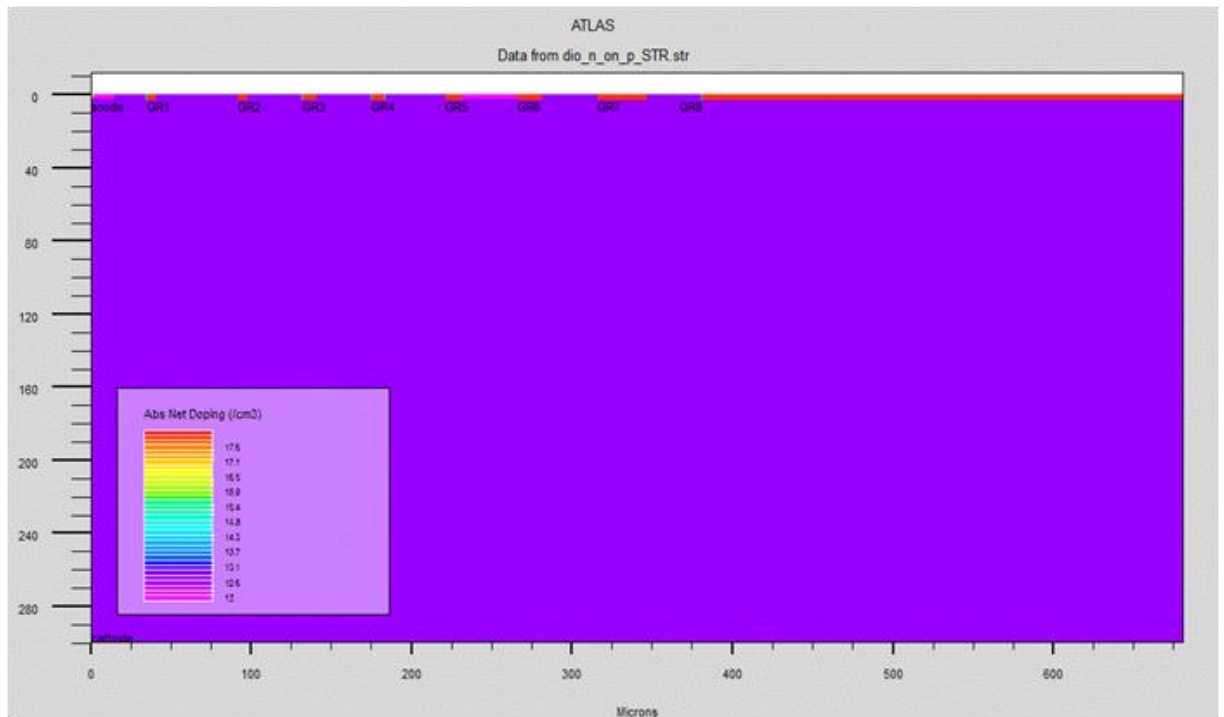


Figure2.7 Type et concentration des dopants avec Atlas.

SPECIFICATION DES MATERIAUX ET DEMODELES

Après avoir défini la spécification de la structure, il faut spécifier les modèles des matériaux, elle se compose de quatre parties : matériau, modèles, contact et interface.

e Matériau

Le format d'Atlas pour définir le matériau est le suivant :

MATERIAL < localisation >< material_définition >

Nous avons donné ci-dessous trois exemples pour la commande Matériel:

**MATERIAL MATERIAL=Silicon EG300=1.1 MUN=1200 MATERIAL
REGION=4TAUN0=3e-7 TAUP0=2e-5 MATERIAL NAME=base NC300=4e18**

Dans tous les exemples, lorsque MATERIAL apparaît le premier, il est considéré comme commande. Lorsque MATERIAL apparaît une seconde fois dans le premier exemple, il est considéré comme un paramètre de localisation. Dans les deuxième et troisième exemples, les paramètres de localisation sont région et name respectivement[1].

f **Modèles physiques**

Les modèles physiques dans les semi-conducteurs ont été modélisés sous la forme d'expressions mathématiques reliant le potentiel électrostatique et la densité des porteurs.

Les modèles physiques sont classés en cinq catégories:

- Mobilités des porteurs de charges
- Mécanismes de génération-recombinaison
- Les statistiques de transport
- L'ionisation par impact
- L'effet tunnel

La syntaxe de la déclaration du modèle est la suivante:

MODELS < general parameter >< model dependent parameter >

Tous les modèles sont spécifiés dans MODELS à l'exception de l'impact par ionisation.

Exemple :

IMPACT selber

g **Contact**

Il existe aussi les modèles qui concernent le type de contact soit contact ohmique qui connaît par défaut et le contact redresseur (contact de Schottky). Ce dernier est reconnu par un travail de sortie (work function). Ce qui suit est un exemple de la commande Contact.

CONTACT name=anode

h **Interface**

La déclaration d'interface est utilisée pour définir la densité de charge à l'interface entre les semi-conducteurs et les isolants .Par exemple, les déclarations:

INTERFACE $qf=10^{+12}$

2.6.2 Spécification Méthodes numériques decalcul

Après la précision du modèle de matériaux, la sélection de la méthode numérique doit être indiquée. Parmi les différentes méthodes numériques de résolution des systèmes d'équation, trois types de techniques sont utilisée dans « Silvaco-Atlas »:

***a* Méthode GUMMEL**

La méthode de 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 sont faiblement couplées et lorsqu'il y a convergence linéaire.

***b* Méthode 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* Méthode BLOCK**

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

2.6.3 Spécification des Solutions

Après avoir terminé la sélection de la méthode numérique, la prochaine étape est la spécification de solution. La spécification de solution se décompose des commandes suivantes log, solve, load, et save.[1]

***a* Log**

LOG enregistre toutes les caractéristiques finales de simulation dans un fichier de données. N'importe quel type de données, générées par la commande SOLVE est sauvé après la commande LOG. Si dans le programme il y a plusieurs commandes LOG, chaque fois le fichier log qui a été ouvert avant est fermé, et un nouveau fichier log est

ouvert.

b Solve

La commande SOLVE suit l'instruction LOG. SOLVE effectue une Solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Ce qui suit est un exemple de la commande SOLVE.

```
solve vsubstrate=-0.2 vstep=-0.2 vfinal=-1 name=substrate
```

c Load etsave

La commande LOAD entre les solutions précédentes à partir de fichiers comme estimation initiale à d'autres points de polarisation. L'instruction SAVE entre toutes les informations d'un point de nœud dans un fichier de sortie. Ce qui suit sont des exemples des instructions LOAD et SAVE.

d SAVE OUTF=SOL.STR

Dans ce cas, les informations sont enregistrées dans le fichier SOL.STR après une commande SOLVE. Puis, dans une simulation différente, SOL.STR peut être chargé comme suit:

```
LOAD INFILE=SOL.STR
```

2.6.4 Analyse des résultats

Une fois qu'une solution a été trouvée pour un problème de dispositif semi-conducteur, les informations peuvent être affichées graphiquement avec l'instruction TONYPLOT. En outre, les paramètres du dispositif peuvent être extraits avec la commande EXTRACT.[9]

a Extract

L'ordre d'EXTRAIT est fourni dans l'environnement DECKBUILD. les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises . L'ordre a une syntaxe flexible qui permet de construire des routines d'EXTRAIT spécifiques. L'EXTRAIT opère sur le dossier de structure ou de courbe résolu précédent. Par défaut, l'EXTRAIT utilise le fichier journal actuellement ouvert.

la routine d'extraction. Par exemple :

EXTRACT INIT INF="**<filename>**".

b Tonyplot

Tonyplot permet de spécifier et comploter des fonctions des caractéristiques terminales dans les champs de texte de Fonction de Graphique.

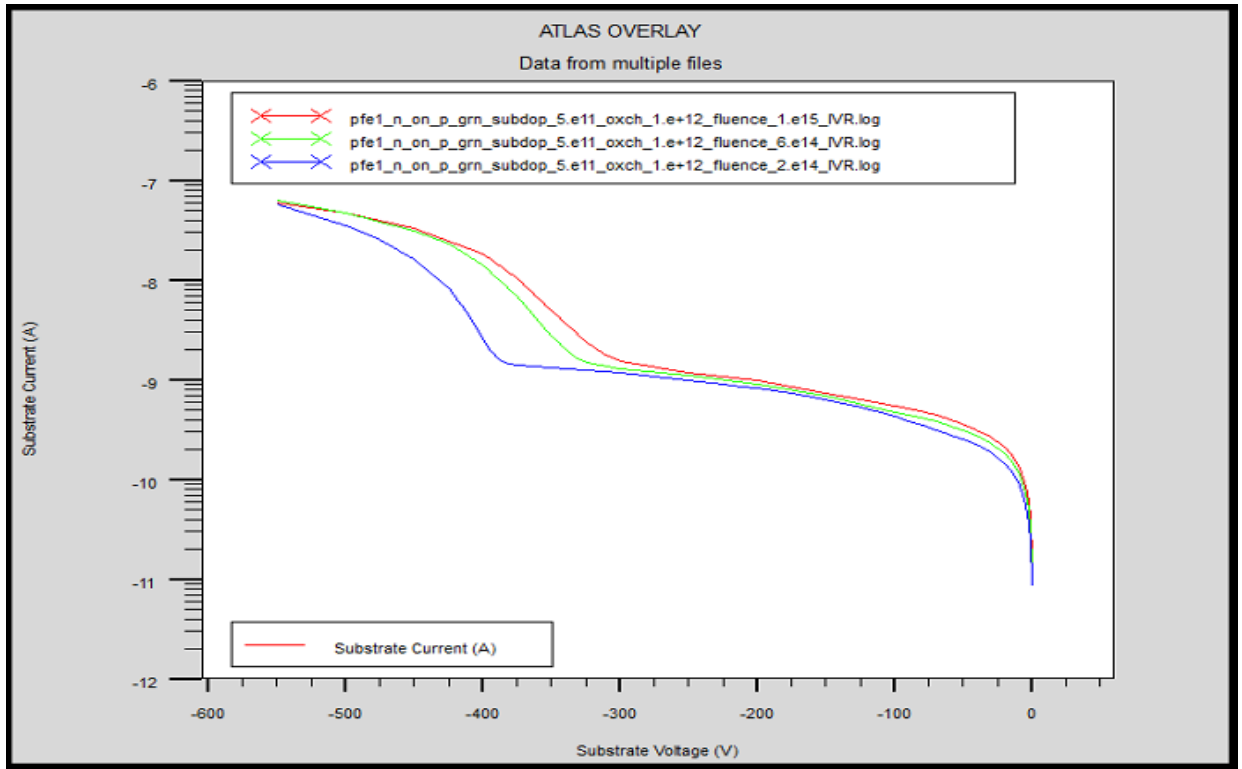


Figure2.8 Des courbes de l'échantillon IV

2.7 Spécification des pièges

2.7.1 Charge piégée dans l'équation de Poisson

La charge totale causée par la présence de pièges est soustraite du côté droit de l'équation de Poisson. La valeur de charge totale est définie par:

$$Q_T = q(N_{TD}^+ - N_{TA}^-) \tag{2.1}$$

La densité ionisée dépend de la densité de pièges et sa probabilité d'ionisation, F_{tA} et F_{tD} . Pour les pièges comme accepteur et comme donateur respectivement, les densités ionisées sont calculées par les équations:

$$N_{tD}^+ = \text{DENSITY} \times F_{tD} \quad (2.2)$$

$$N_{tA}^- = \text{DENSITY} \times F_{tA}$$

La probabilité d'ionisation suppose que les sections transversales de capture sont constantes pour toutes les énergies dans une bande donnée et suit l'analyse développée par Simmons et Taylor. La probabilité d'ionisation est donnée par les équations suivantes pour accepteur et donneur comme pièges. [10]

$$F_{tA} = \frac{v_n \text{SIGN } n + e_{pA}}{v_n \text{SIGN } n + v_p \text{SIGP } p + e_{nA} + e_{pA}} \quad (2.3)$$

$$F_{tD} = \frac{v_p \text{SIGP } p + e_{nD}}{v_n \text{SIGN } n + v_p \text{SIGP } p + e_{nD} + e_{pD}}$$

Où SIGN et SIGP sont les sections de capture pour les électrons et les trous respectivement, v_n et v_p sont les vitesses thermiques pour les électrons et les trous. Pour les donateurs comme des pièges, les taux d'émission électrons et de trous, e_{nD} et e_{pD} , sont définis par:

$$e_{nD} = \frac{1}{\text{DEGEN.FAC}} v_n \text{SIGN } n_i \exp \frac{E_t - E_i}{kT_L} \quad (2.4)$$

$$e_{pD} = \text{DEGEN.FAC } v_p \text{SIGP } n_i \exp \frac{E_i - E_t}{kT_L}$$

Où E_i est la position intrinsèque du niveau de Fermi, E_t est le niveau d'énergie de piège tel que défini par E.LEVEL et DEGEN.FAC est le facteur de dégénérescence du centre piège.

Les taux d'émission électrons et de trous, e_{nA} et e_{pA} , sont définies

$$e_{nA} = \text{DEGEN.FAC } v_n \text{ SIGN } n_i \exp \frac{E_t - E_i}{kT_L}$$

$$e_{pA} = \frac{1}{\text{DEGEN.FAC}} v_p \text{ SIGP } n_i \exp \frac{E_i - E_t}{kT_L}$$
(2.5)

2.7.2 La commande TRAP

La commande TRAP active des pièges à des niveaux discrets d'énergie au sein de la bande interdite du semi-conducteur et fixe les valeurs des paramètres. Elle est définie comme suit :

TRAP donor | acceptor e.level=<r> density=<r> degen=<v><capture parameters>
region | number

TRAP active le modèle et est utilisée pour:

- Indiquer le type de pièges donneurs (DONNORS) ou accepteurs (ACCEPTORS)
- Spécifiez le niveau d'énergie dans la bande interdite (E.LEVEL)
- Indiquer la densité des centres de piégeage DENSITY
- Indiquer la section efficace des pièges SIGN et SIGP
- Indiquer le facteur de dégénérescence DEGEN.FAC

L'exemple suivant définit trois niveaux de pièges discrets dans la bande interdite de silicium.

TRAP e.level=0.42 acceptor density=2e15 sign=9.5e-15 sigp=9.5e-14 degen=1

TRAP e.level=0.46 acceptor density=1e15 sign=5.e-15 sigp=5e-14 degen=1

TRAP e.level=0.36 donor density=1e15 sign=3.23e-13 sigp=3.23e-14 degen=1

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une partie du logiciel de simulation des caractéristiques électriques «Atlas» de la société SILVACO, que nous avons utilisé principalement pour modéliser un détecteur à base de silicium dédié pour les applications de physique à haute énergie.

Chapitre 3 Résultats et discussion

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier en première partie la simulation électrique de deux structures de type détecteurs de particules au silicium dont le substrat est de type p et le pixel est de type n. La différence entre les deux structures réside au niveau des anneaux de garde, où la première comporte des anneaux de garde de type p [12] et la deuxième sont de type n. Dans ce qui suit, la première structure sera nommée n-on-p-GRP et la deuxième structure sera nommée n-on-p-GRN.

Les deux structures sont polarisées en inverse et on extrait les caractéristiques courant-tension pour une température de 300K.

Cette étude du comportement électrique se fera au moyen de l'outil ATLAS-TCAD qui permet d'extrapoler le comportement électrique du composant électronique en se basant sur des modèles spécifiques pour chaque phénomène physique sont vérifiés et valider les paramètres technologiques (dopage de substrat, les charges d'oxyde dopage ,variation de anneau de garde) donc, nous avons utilisé plusieurs simulations technologiques et électriques.

La deuxième partie consiste à étudier l'influence des radiations sur les deux structures, à l'aide de la simulation électrique, sur leur comportement électrique.

Les simulations ont été effectuées pour l'obtention des variations de la tension de claquage et le courant de fuite (les caractéristiques électriques), on compare avec les résultats de simulation de l'article [12] qui été fait avec un autre simulateur le Synopsis Sentaurus.

3.2 Simulation de la structure avec l'outil de simulation ATLAS

L'outil SILVACO permet la simulation de processus technologique étape par étape. Il est en quelque sorte le moyen d'effectuer un prototypage virtuel avec lequel nous pouvons valider nos choix technologiques. Nous avons donc utilisé la simulation du processus technologique pour étudier les pièges qui sont créés par des radiations et de valider nos choix technologiques (dopage de substrat, la charge de l'oxyde).

Le processus technologique a été simulé sur un logiciel de simulation bidimensionnel, suffisant pour nos structures. Une simulation du comportement électrique statique des dispositifs a été ensuite réalisée pour valider les tensions de claquage et le courant de fuite.

3.3 Description de la structure

Notre structure de référence que nous allons étudier par simulation est un capteur réalisé sur un substrat en Si type p. avec des paramètres technologiques et géométriques qui sont bien définis dans le tableau (3.1).

Paramètres	Structure n-on-p GRP	Structure n-on-p GRN	Unités
Dopage du substrat (type p)	5×10^{11}	5×10^{11}	cm^{-3}
Epaisseur du substrat	300	300	μm
Epaisseur de la couche d'oxyde	1	1	μm
La charge d'oxyde	4×10^{11}	4×10^{11}	cm^{-2}
Profondeur d'anneau de garde	1,5	1,5	μm
Pixel (type p)	1,5	1,5	μm
Type de l'anneau	type P	type N	

de garde			
P-spray	Sans	0,5	μm
Profondeur du p-spray	Sans	1,5	μm
Profondeur aluminium	1	1	μm
Epaisseur de l'aluminium	15	15	μm

Tableau3.1 Résumé des valeurs adoptées pour la simulation des deux structures avec l'outil TCAD SILVACO.

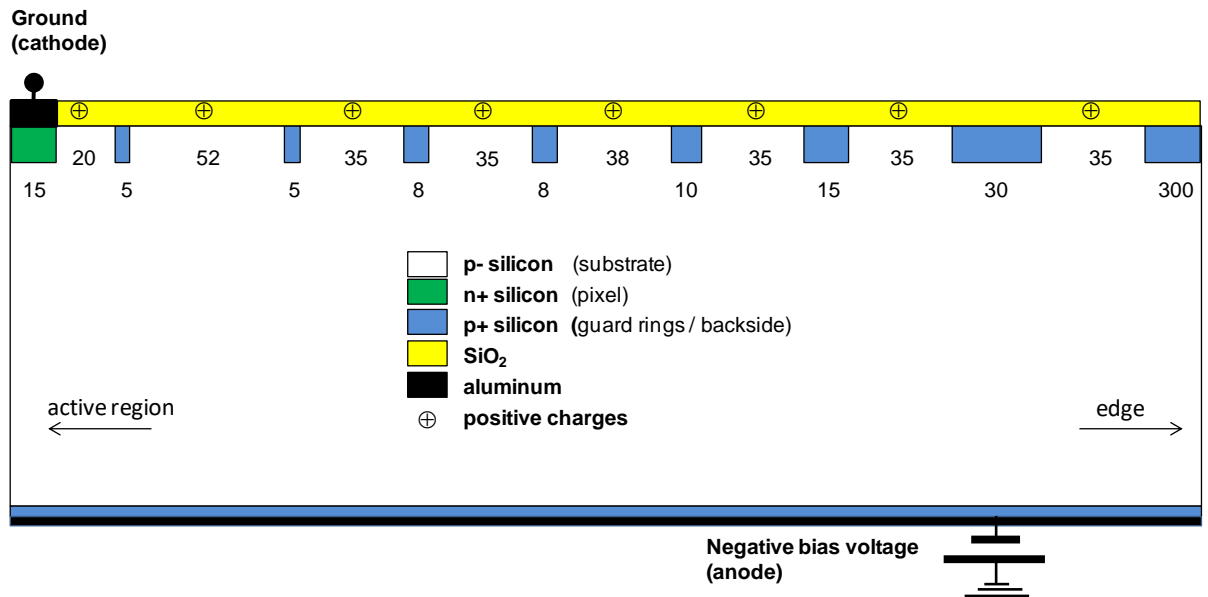


Figure3.1 Vue schématique de la structure n-on-p avec des anneaux de garde de type p nommée n-on-p-GRP[12].

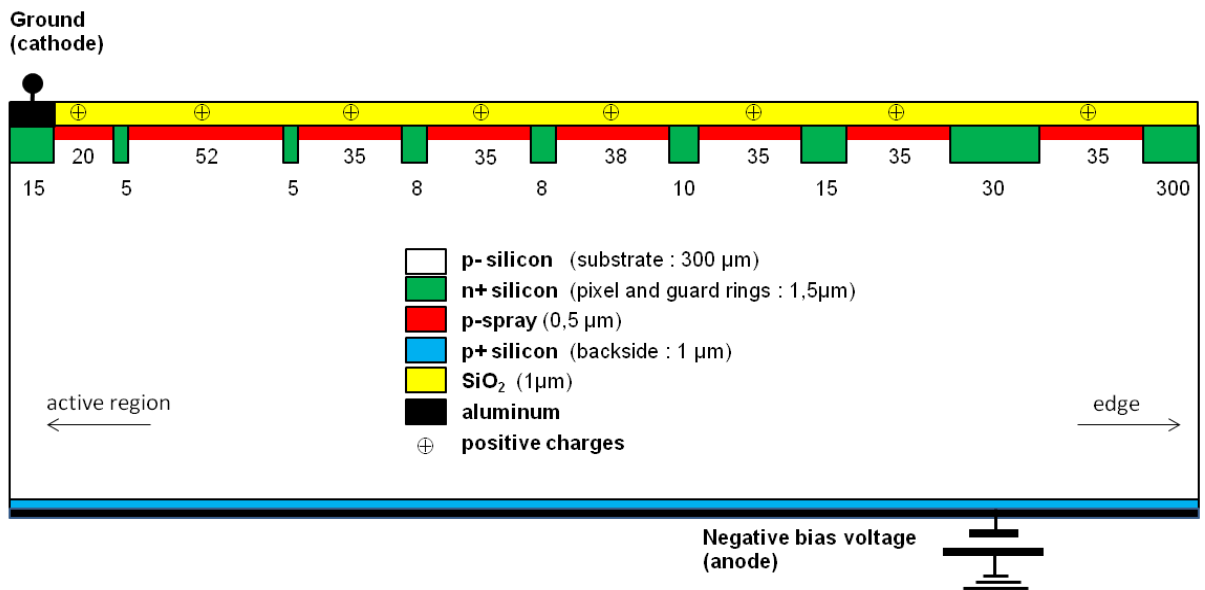


Figure 3.2 Vue schématique de la structure n-on-p avec des anneaux de garde de type n nommée n-on-p-GRN.

La figure 3.1 représente le schéma de la structure étudiée n-on-p avec anneaux de garde de type n nommée n-on-p-GRP.

La figure 3.2 représente le schéma de notre modèle étudiier n-on-p avec des anneaux de garde de type n nommée n-on-p-GRN.

3.4 Effet des paramètres technologiques sur les caractéristiques électriques non irradiées

3.4.1 Anneau de garde

On peut remarquer les différentes caractéristiques courant-tension sans et avec anneaux de garde dans la figure 3.3. La tension de claquage augmente dès qu'on ajoute les anneaux de garde. D'après la structure étudiée qui représente le champ électrique par l'effet des anneaux de garde dans la figure 3.4, on remarque que le champ électrique est plus intense en absence des anneaux de garde cependant l'intensité de ce champ électrique diminue en présence de ce dernier.

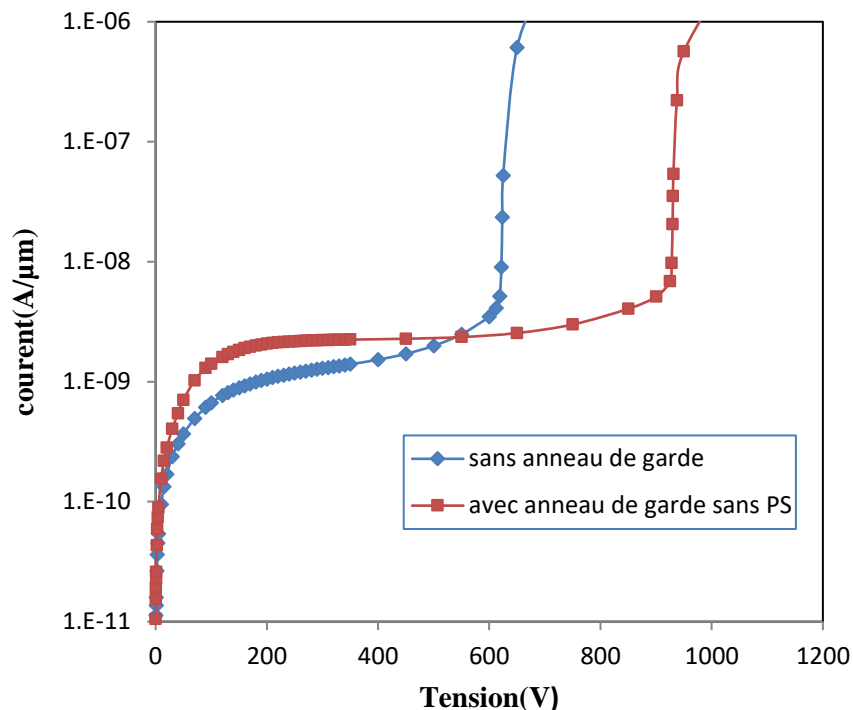


Figure3.3 Caractéristiques courant-tension de la structure avec et sans anneaux de garde de type n et sans p-spray.

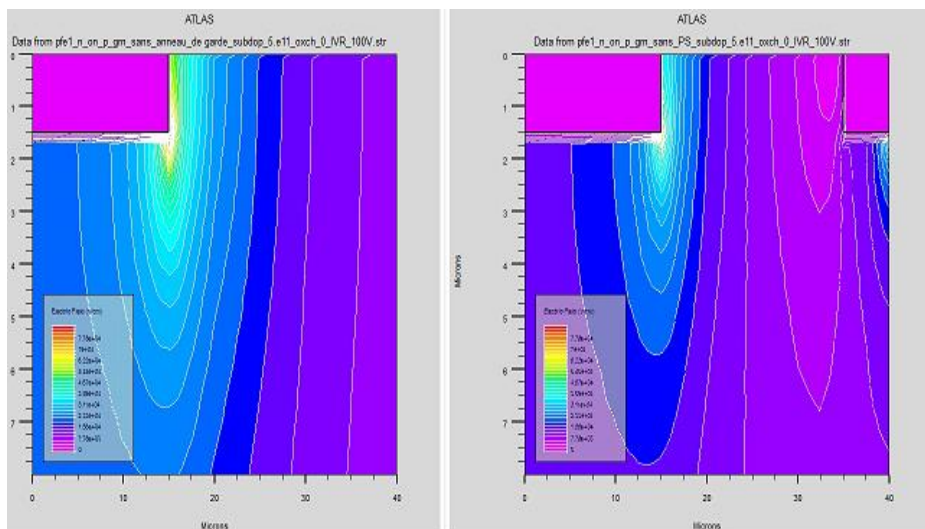


Figure3.4 Le champ électrique de la structure n-on-p-GRN sans et avec anneau de garde à une tension de polarisation de 100V.

3.4.2 Dopage du substrat

Dans cette partie nous allons étudier l'effet du dopage du substrat sur les performances électriques des deux détecteurs au silicium avec des anneaux de garde différents.

a Structure avec anneaux de garde de type p

La structure simulée est celle de l'article [12]. La figure 3.5 présente les différentes caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs du dopage du substrat, qui sont: $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ et $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Les résultats sont presque similaires à ceux de Koybasi [12]. Cependant la différence se trouve au niveau des valeurs du courant de fuite. Ceci est dû à l'utilisation de deux logiciels de simulation différents, Synopsis pour Koybasi et Silvaco dans notre travail.

Ces caractéristiques I-V montrent clairement que la tension de claquage diminue lorsque le dopage du substrat augmente. Nous remarquons que la tension de claquage chute rapidement, de 1050 V à 1000 V, lorsque le dopage varie de $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ à $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ Tandis qu'elle diminue légèrement à 950 V lorsque le dopage passe à $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Concernent le courant de fuite, ce dernier varie très peu lorsque le dopage varie de $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ à $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, sa valeur avoisine les 2 nA/ μm . Lorsque le dopage du substrat est de $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ce courant diminue fortement.

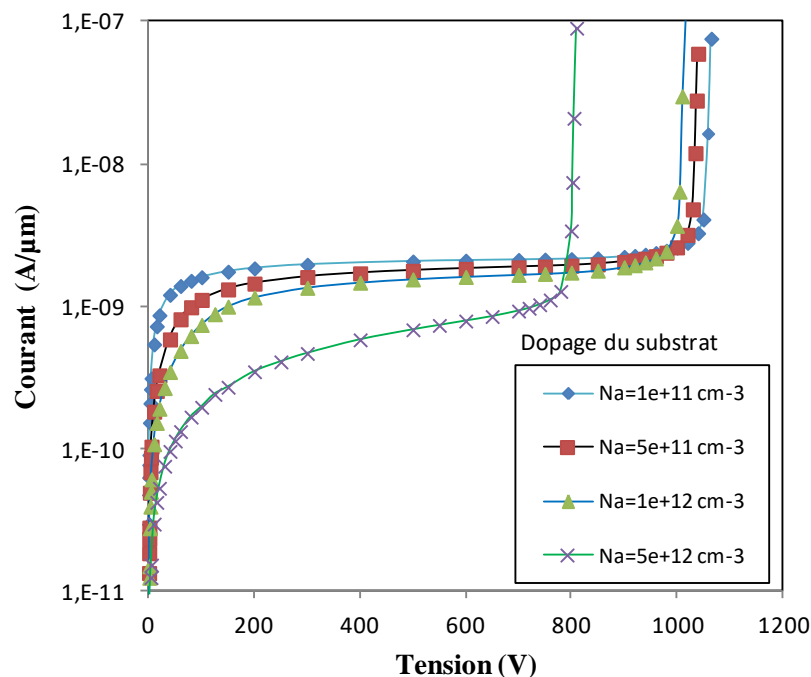


Figure 3.5 Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs du dopage du substrat pour la structure n-on-p-GRP.

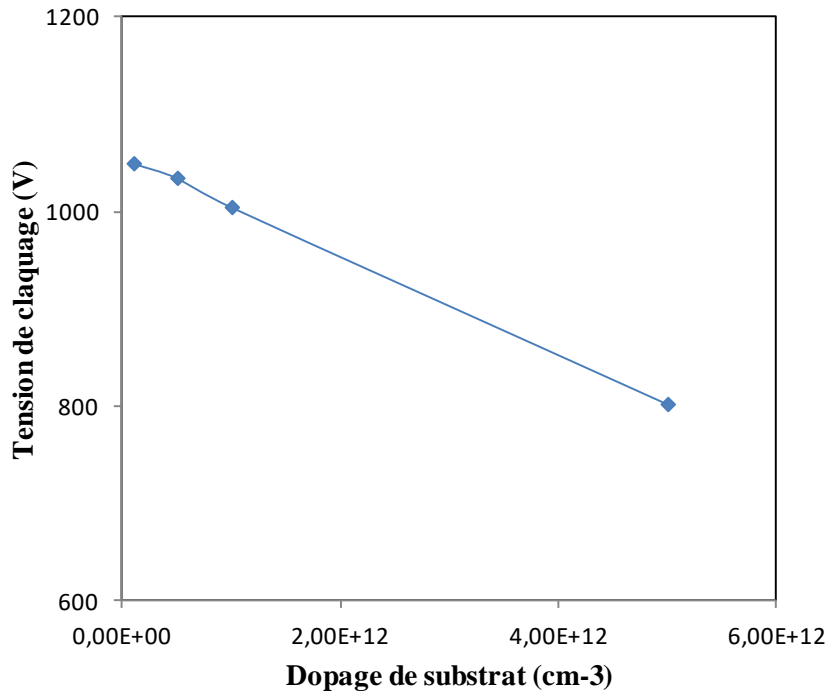


Figure3.6 Variation de la tension de claquage en fonction du dopage du substrat de la structure n-on-p-GRP.

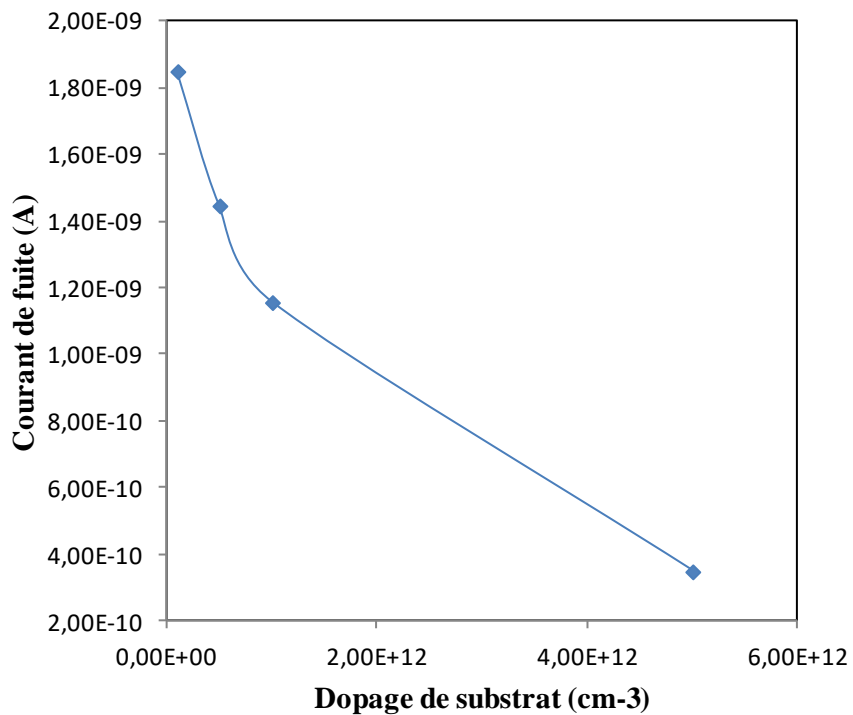


Figure3.7 Variation du courant de fuite en fonction du dopage du substrat de la structure n-on-p-GRP.

***b* Structure avec anneaux de garde de type n**

Sans p-spray

On peut voir dans la figure 3.8 les différentes caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs du dopage de substrat de la structure n-on-p-GRN sans p-spray, qui sont: $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ et $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Ces caractéristique diminue de manière lentement. Lorsque le dopage du substrat augmente. Nous remarquons que la tension de claquage chute lentement, de 2760 V à 2700 V, lorsque le dopage varie de $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ à $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ Cependant elle chute rapide à 2400 V. D'après la figure 3.10 le courant de fuite, reste constant de $2 \text{ nA}/\mu\text{m}$ pour les valeurs de dopage concerné.

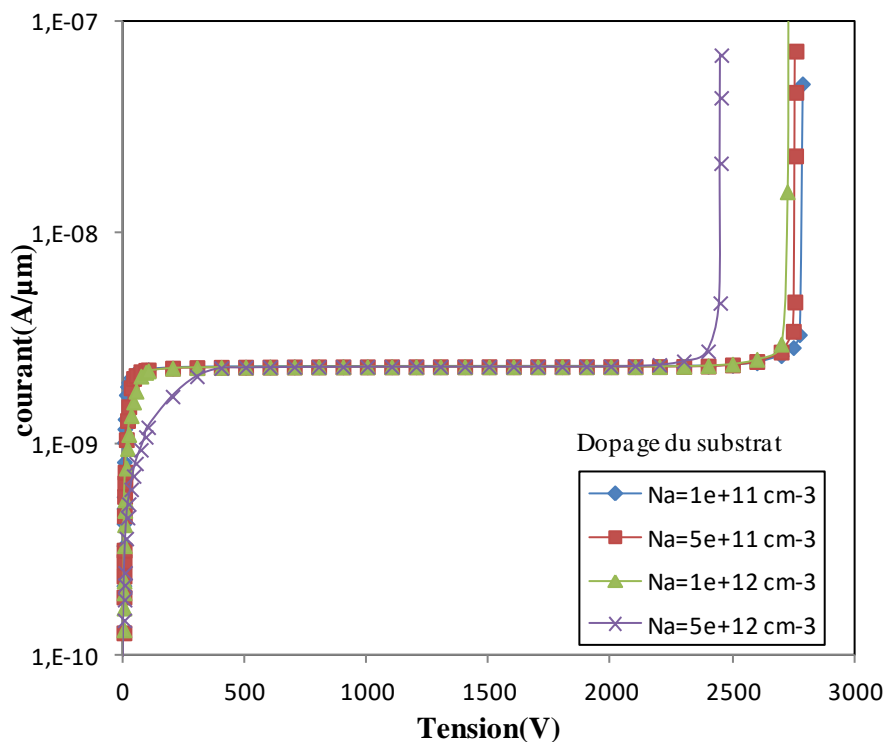


Figure 3.8 Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs du dopage du substrat pour la structure n-on-p-GRN sans p-spray.

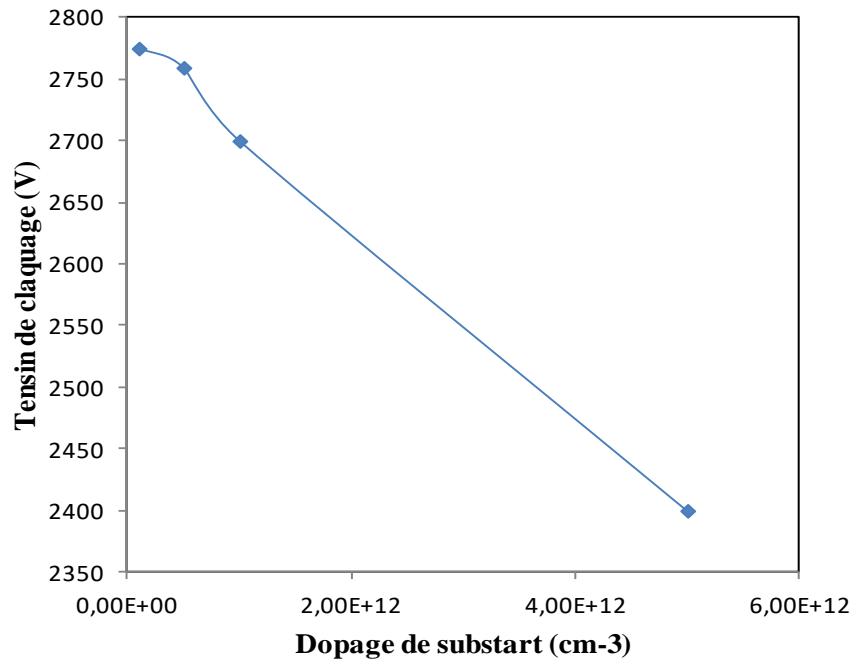


Figure3.9 Variation de la tension de claquage en fonction du dopage du substrat n-on-p-GRN avec p-spray.

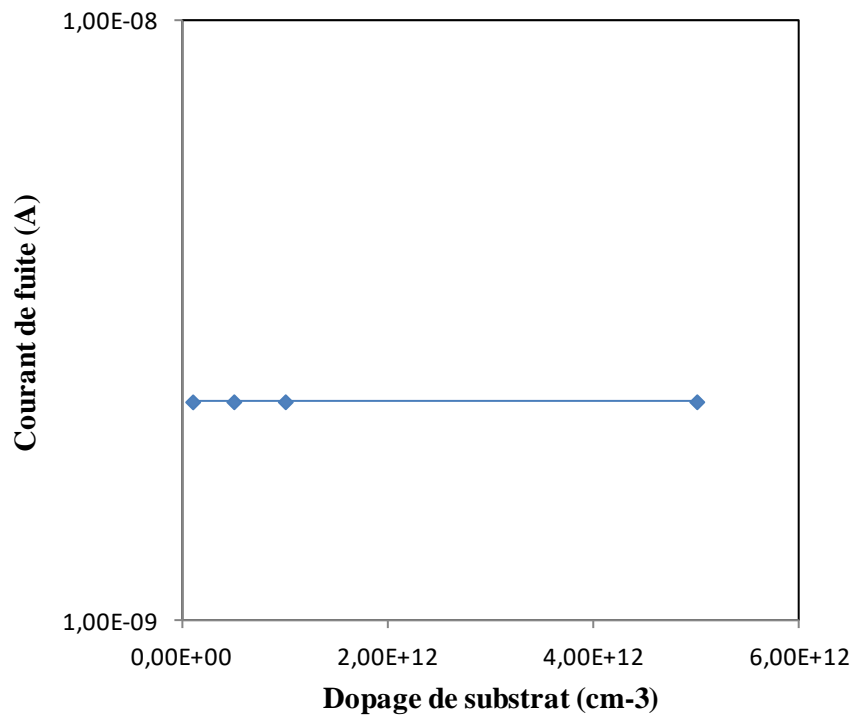


Figure3.10 Variation du courant de fuite en fonction du dopage du substrat n-on-p-GRN(sans p-spray)

Avec p-spray

La figure 3.11 présente les différentes caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs du dopage du substrat, qui sont: $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ et $5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Ces caractéristiques IV montrent rapidement jusqu'au le maximum 1200V à dopage de $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, que la tension de claquage diminue lorsque le dopage du substrat augmente. Nous remarquons que la tension de claquage chute lentement, de 1200 V à 1100 V, lorsque le dopage varie de $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ à $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. Cependant elle diminue légèrement à 900 V lorsque le dopage passe à $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. En ce qui concerne le courant de fuite, ce dernier varie très peu lorsque le dopage varie de $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ à $5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$, sa valeur avoisine les 2,3 nA/ μm . Lorsque le dopage du substrat est de $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ce courant diminue lentement.

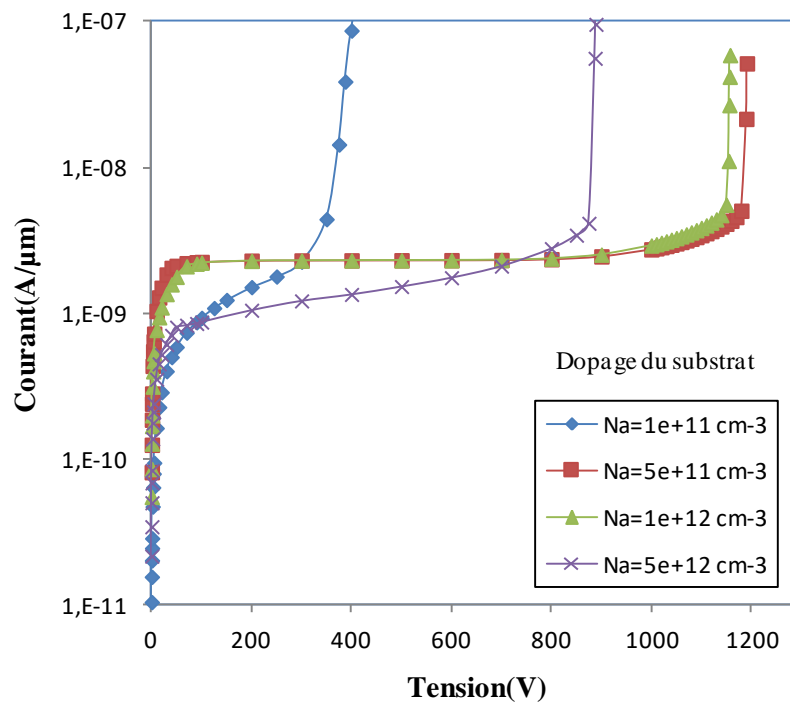


Figure 3.11 Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs du dopage du substrat pour la structure n-on-p-GRN avec p-spray.

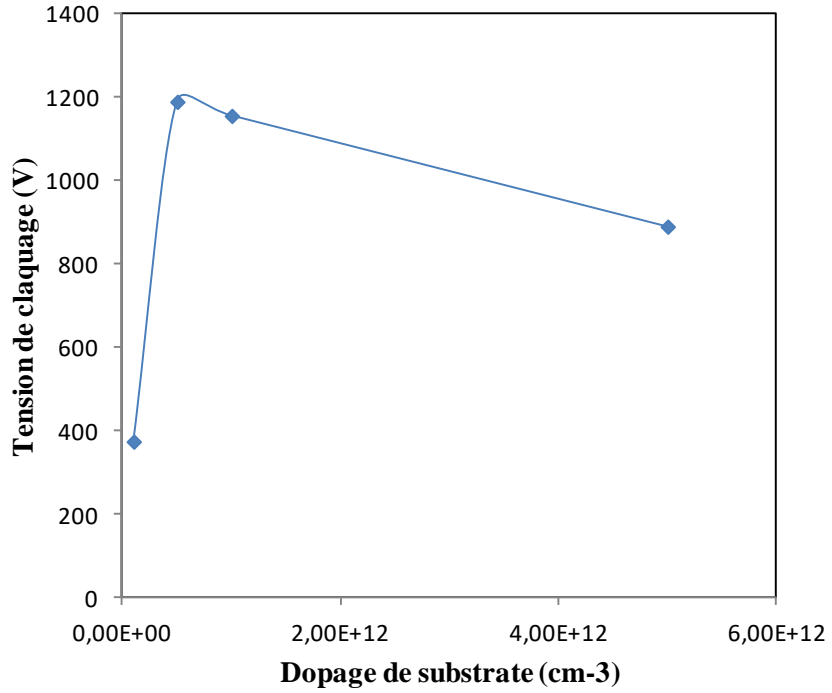


Figure3.12 Variation de la tension de claquage en fonction du dopage du substrat de la structure n-on-p-GRN(avec p-spray).

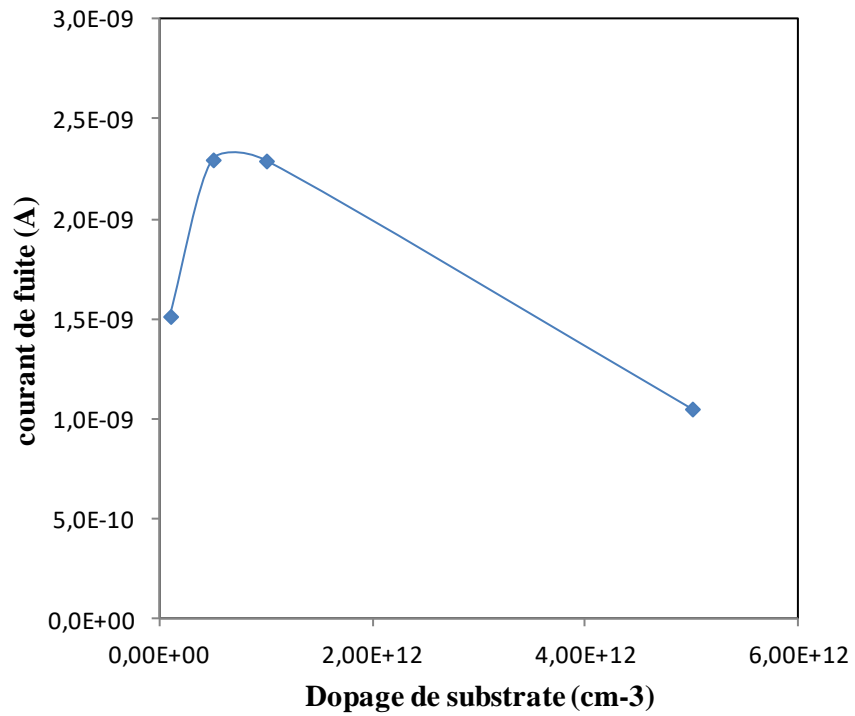


Figure3.13 Variation du courant de fuite en fonction du dopage du substrat de la structure n-on-p-GRN (avec p-spray).

La figure 3.14 présente les différentes caractéristiques courant-tension sans charge dans l'oxyde pour la structure n-on-p-GRP et la structure n-on-p-GRN(avec et sans p-spray).

Ces caractéristiques I-V montrent clairement que la tension de claquage augmente de 350V pour la structure n-on-p-GRN avec p-spray et de 400V pour la structure n-on-p-GRP .tandis que la structure n-on-p-GRN sans p-spray continue d'augmenter jusqu'au 950V.

pour une tension de 200V Le courant de fuite, augmente brusquement lorsque' on passe de la structure n-on-p-GRP à la structure n-on-p-GRN(avec p-spray)de 0,1nA/μm à 0,6nA/μm et augmente rapidement jusqu'à 2,1nA/μm pour la structure n-on-p-GRN(sans p-spray).

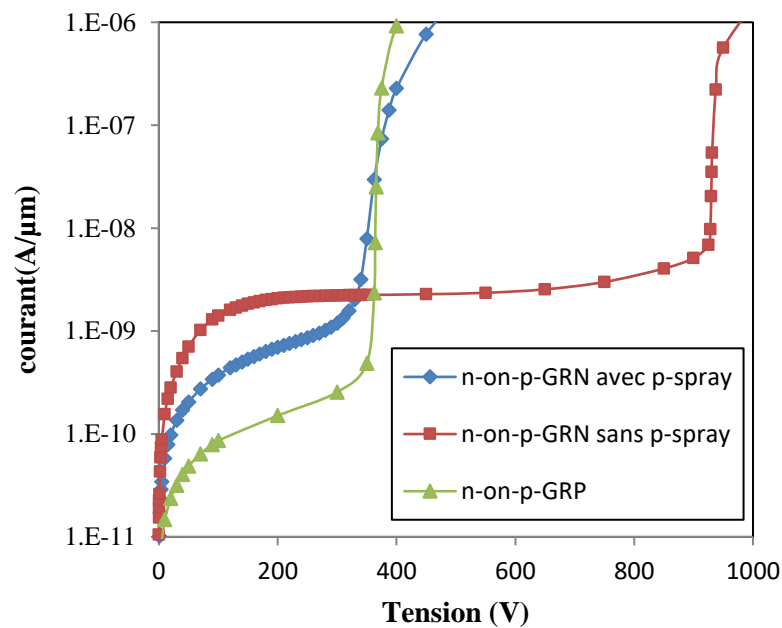


Figure3.14 Caractéristiques courant-tension de différentes structures sans charges dans l'oxyde.

D'après figure 3.15 présente le champ électrique sans charges dans l'oxyde. On remarque que pour une tension de 100V le champ électrique est plus intense dans la structure n-on-p-GRN (avec p-spray)par rapport à la structure n-on-p, et très faible pour la structure n-on-p-GRN (sans p-spray).

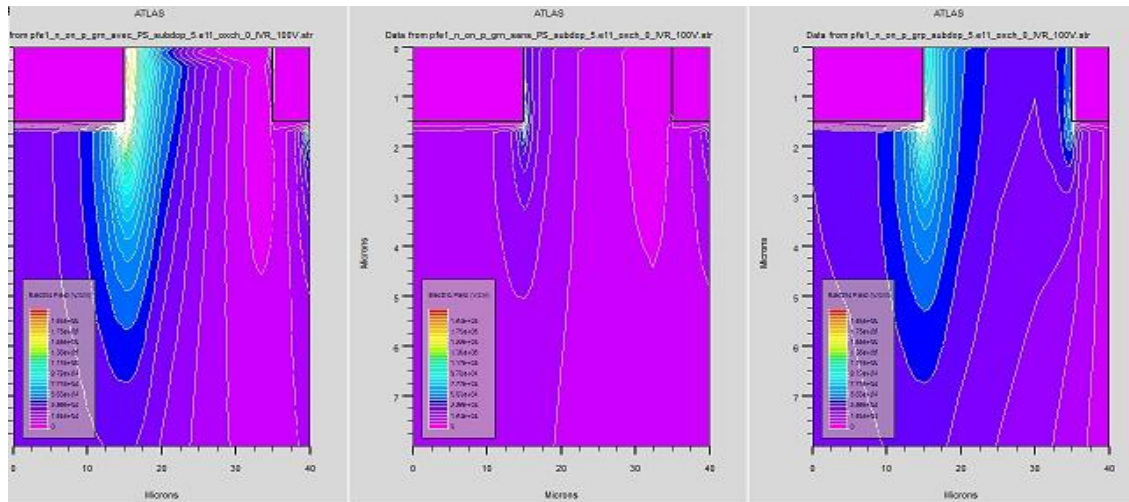


Figure 3.15 Le champ électrique de différentes structures sans charges de l'oxyde à une tension de polarisation de 100V.

3.4.3 Charges dans l'oxyde

a Structure avec anneaux de garde de type p

La structure simulée est celle de l'article [12]. La figure 3.16 présente les différentes caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de la charge de l'oxyde, qui sont: $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ et $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

Ces caractéristiques I-V montrent clairement que la tension de claquage augmente de 500 V à 1200V lorsque la charge de l'oxyde varie de $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ à $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, et diminue au delà de $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

À une tension de 500V Le courant de fuite, augmente brusquement de $1 \text{ nA}/\mu\text{m}$ à $2 \text{ nA}/\mu\text{m}$, lorsque la charge d'oxyde varie de $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ à $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, Cependant il prend une valeur constante lorsque la charge varie de $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ à $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

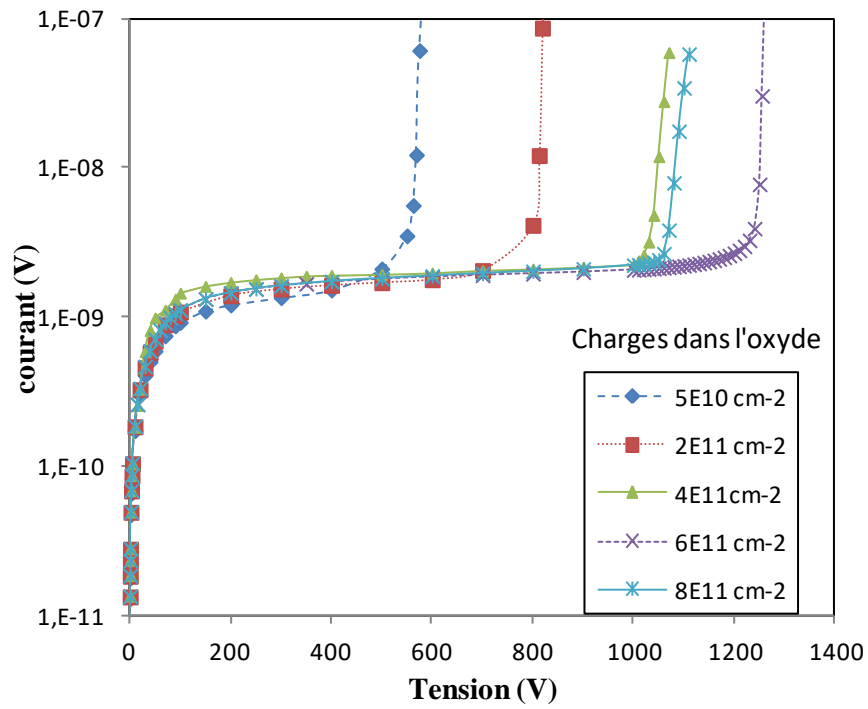


Figure3.16 Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de la charge de l'oxyde de la structure n-on-p-GRP.

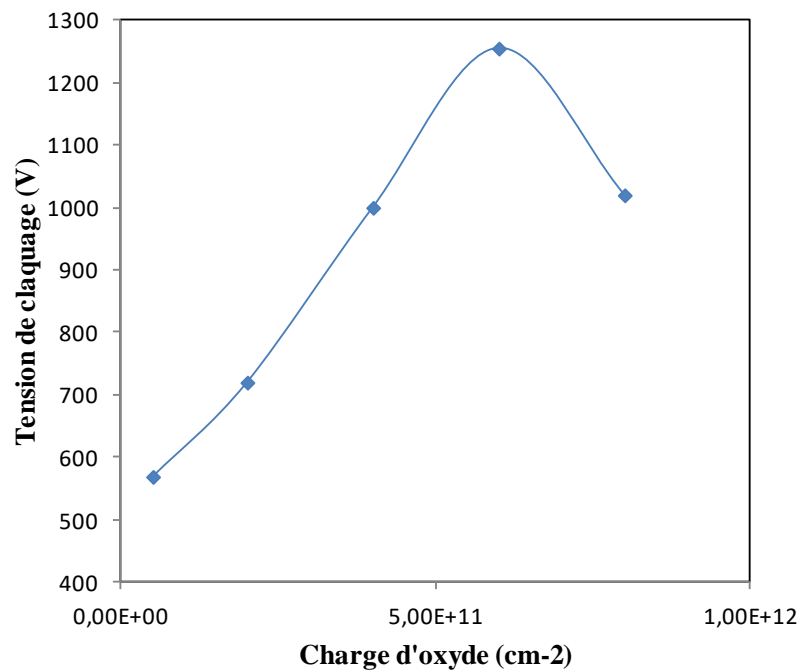


Figure3.17 Variation de la tension de claquage en fonction de la charge de l'oxyde de la structure n-on-p-GRP.

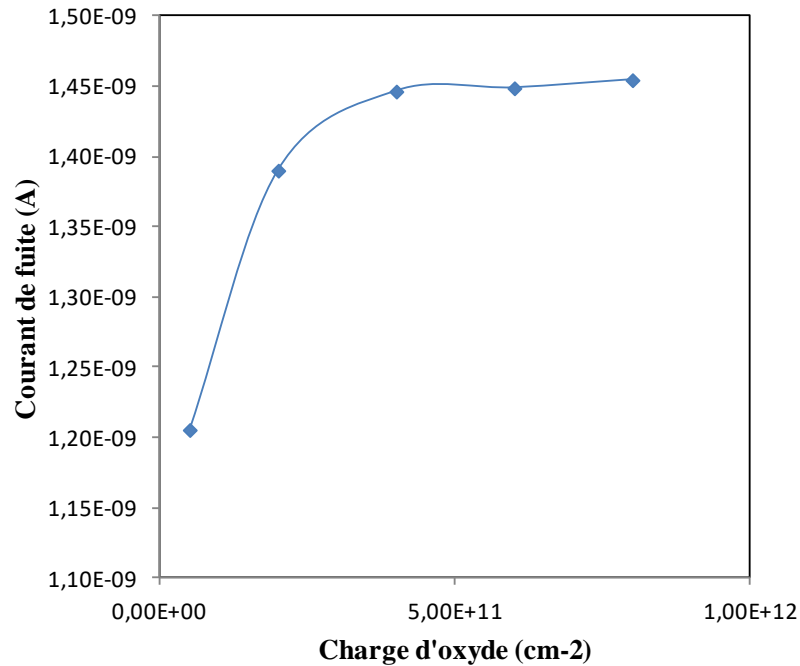


Figure 3.18 Variation de courant de fuite en fonction de la charge de l'oxyde dans la structure n-on-p-GRP.

La figure 3.19 présente la concentration des électrons sur la structure n-on-p-GRP pour une tension 100 V. Cette tension montre clairement que l'intensité de la concentration des électrons est importante dans la jonction p-n. La figure 3.20 montre la concentration des électrons et des trous de la structure n-on-p-GRP pour une tension de 100 V après une ligne de coupe à 0.1 μm sous la surface.

En amont de l'anneau de garde; la concentration des électrons diminue tandis que la concentration des trous est progressivement augmentée.

A la jonction; on remarque une diminution rapide de la concentration des électrons et une augmentation brusque de la concentration des trous. Au niveau de l'anneau de garde les deux concentrations sont en plateau.

En aval de l'anneau de garde la concentration des électrons augmente rapidement et la concentration des trous diminue.

La figure 3.21 présente le profil du potentiel de la structure de la figure 3.19 après une ligne de coupe à 0.1 μm de la surface. Ce profil semble avoir une progression en

escalier entre le pixel et le dernier anneau de garde.

La figure 3.22 présente le profil du champ électrique de la structure de la figure 3.19 après une ligne de coupe à 0.1 μm de la surface. On observe des valeurs intenses du champ électrique en amont de l'anneau de garde par rapport à celle en aval.

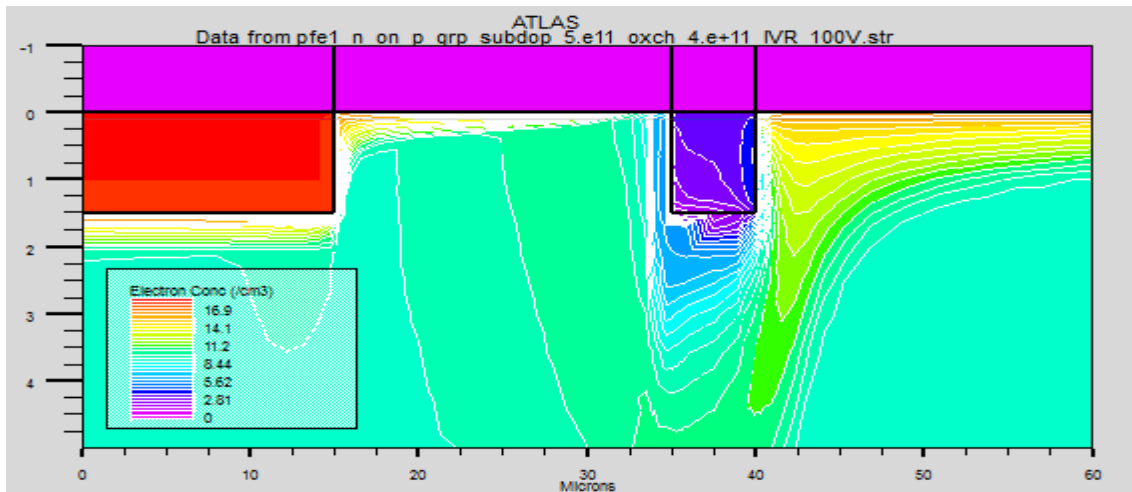


Figure3.19 Vue schématique de la structure n-on-p-GRP avec le premier anneau de garde montrant le profil de la concentration des électrons sous une tension de 100V.

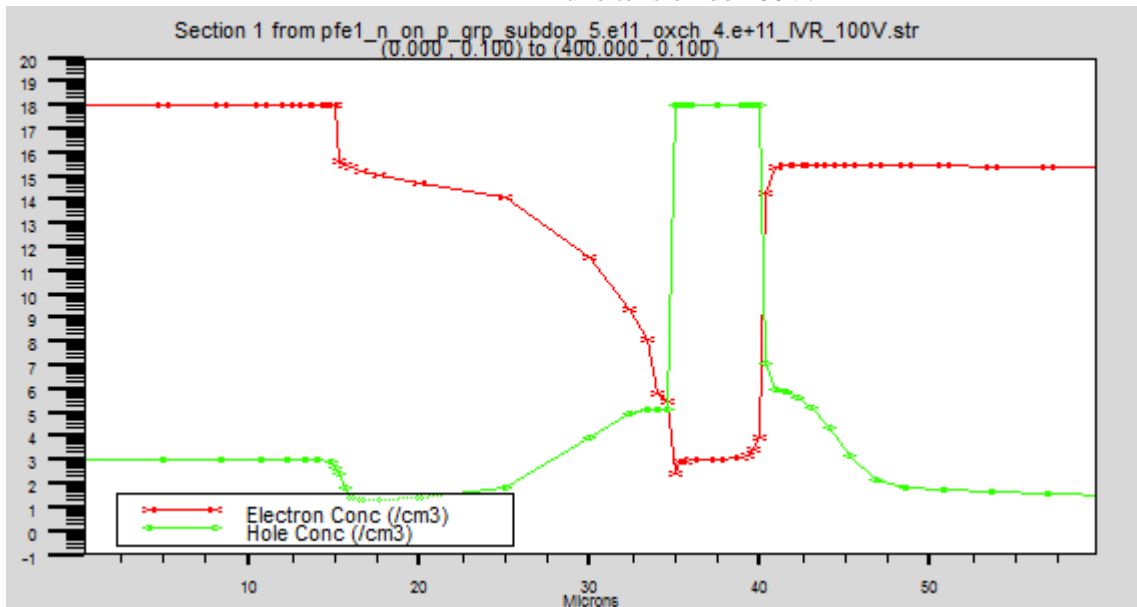


Figure3.20 Profil de la concentration des électrons et des trous de la structure de la figure 3.19 après une ligne de coupe à 0.1 μm de la surface.

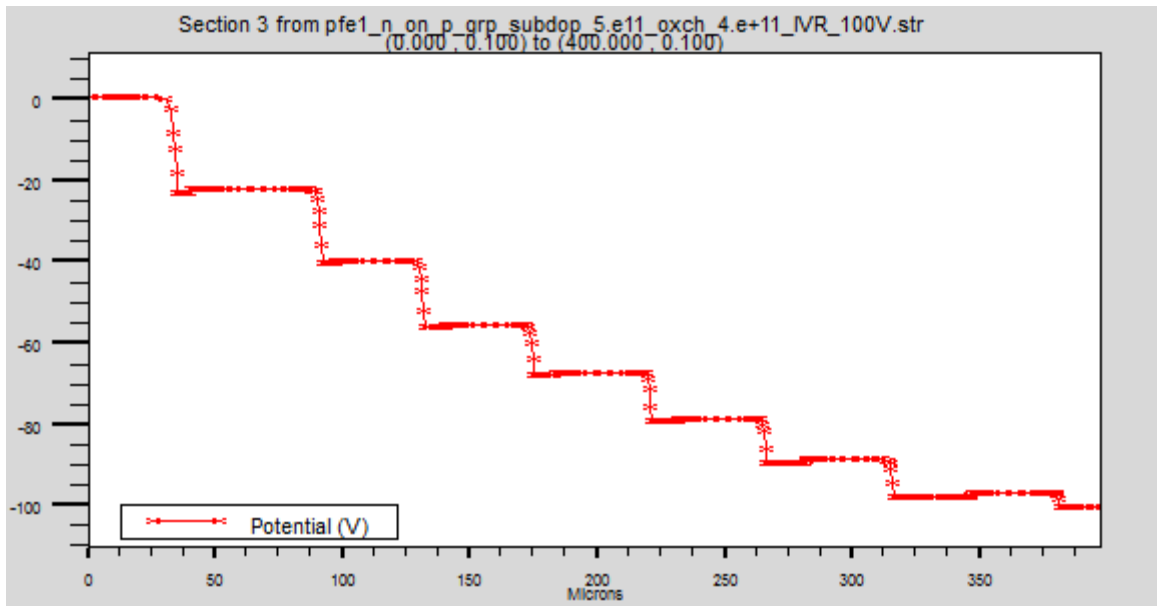


Figure3.21 Profil du potentiel de la structure de la figure 3.19 après une ligne de coupe à 0.1 μ m de la surface.

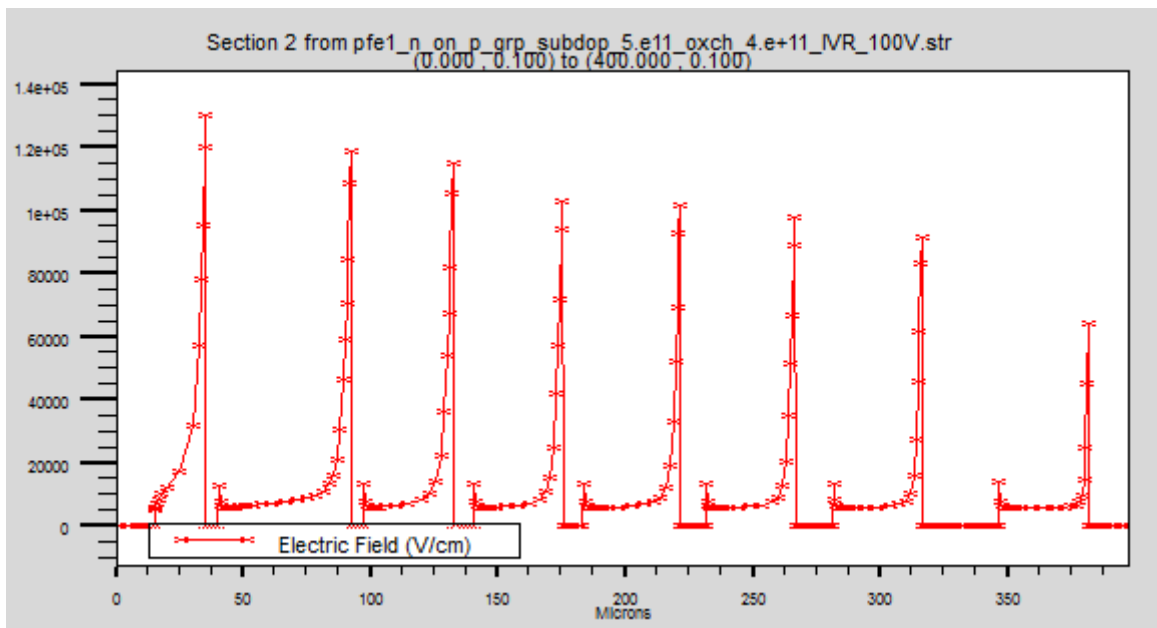


Figure3.22 Profil du champ électrique de la structure de la figure 3.19 après une ligne de coupe à 0.1 μ m de la surface.

b Structure avec anneaux de garde de type n

Sans p-spray

La figure 3.23 présente les différentes caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de la charge de l'oxyde, qui sont: $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ et $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

Ces caractéristiques I-V montrent clairement que la tension de claquage est constante à 900 V lorsque la charge de l'oxyde varie de $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ à $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

Le courant de fuite, pour une tension de 300V prend une valeur constante de 2,3 nA/ μm lorsque la charge d'oxyde varie de $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ à $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

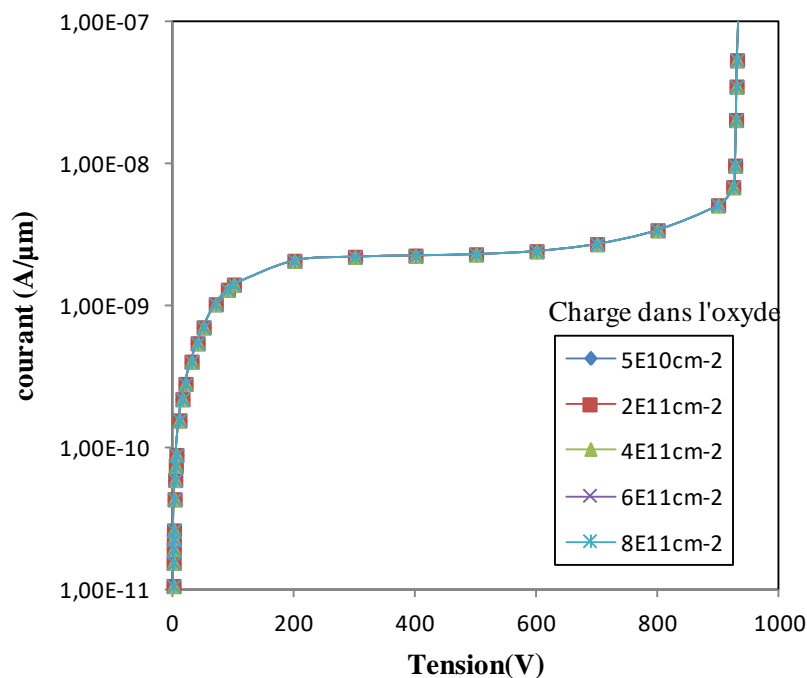


Figure 3.23 Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de la charge de l'oxyde n-on-p-GRN (sans p-spray).

Avec p-spray

La figure 3.24 présente les différentes caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de la charge de l'oxyde, qui sont: $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$, $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ et $8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

Ces caractéristiques I-V montrent clairement que la tension de claquage augmente de 120 V à 1200V lorsque la charge de l'oxyde augmente de $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ à $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$.

Lorsque la charge dépasse $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ le claquage continue à augmenter d'une manière considérable.

La figure 3.25 représente la variation du courant de fuite en fonction de charge d'oxyde en fixant la tension à 300V. On observe une légère diminution de courant de fuite quand la charge d'oxyde varie de $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ à $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, puis il augmente lorsque la charge d'oxyde varie de $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ à $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$. A partir de $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ le courant de fuite se stabilise.

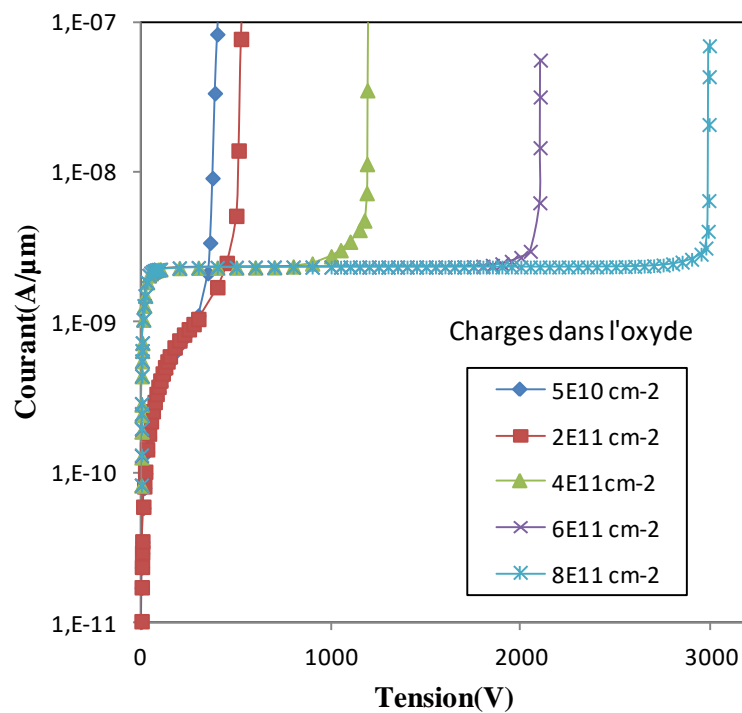


Figure 3.24 Caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de la charge de l'oxyde n-on-p-GRN (avec p-spray).

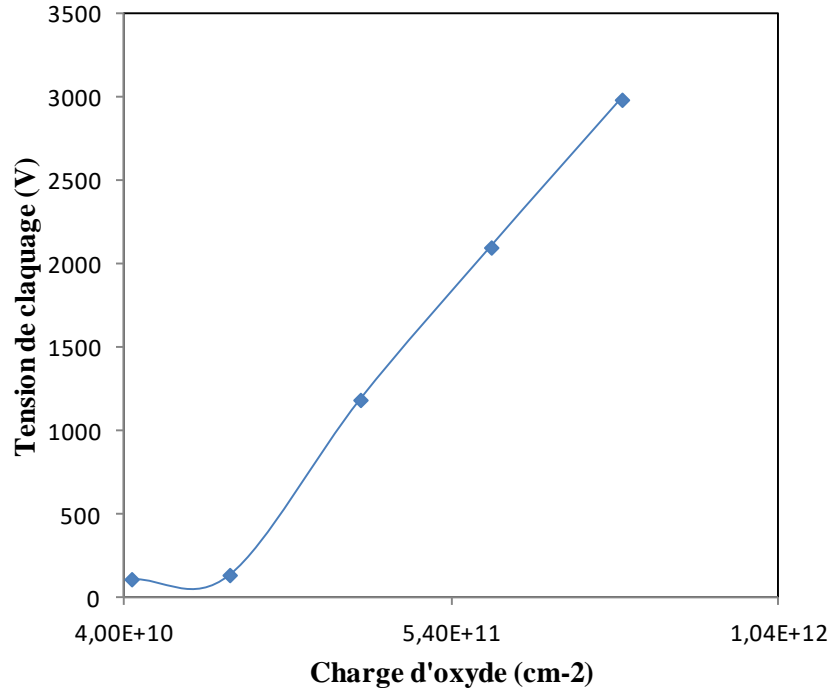


Figure3.25 Variation de la tension de claquage en fonction de la charge de l'oxyde n-on-p-GRN (avec p-spray).

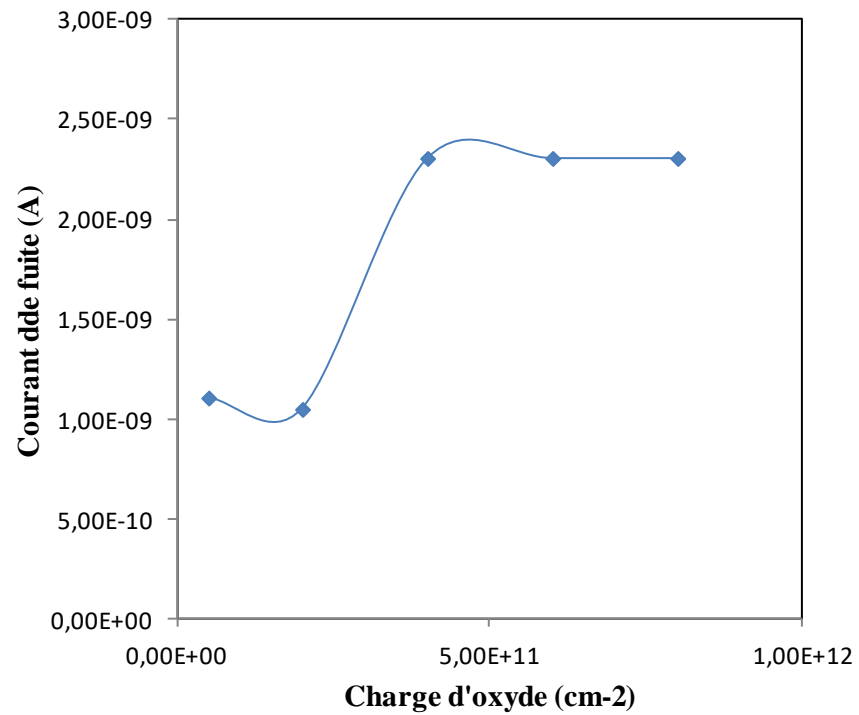


Figure3.26 Variation de courant de fuite en fonction de la charge de l'oxyde n-on-p-GRN (avec p-spray).

La figure 3.27 présente la concentration des électrons d'une structure n-on-p-GRN pour une tension 100 V. Cette tension montre clairement que l'intensité de la concentration des électrons est importante dans la jonction p-n et au niveau de p-spray. La figure 3.28. montre la concentration des électrons et des trous de la structure n-on-p-GRN pour une tension de 100 V après une ligne de coupe à 0.1 μm sous la surface.

Avant l'anneau de garde; la concentration des électrons et les trous sont en plateau.

A la jonction; la concentration des électrons augmente rapidement et la concentration des trous diminue parallèlement. Au niveau de l'anneau de garde les deux concentrations sont stables. Après l'anneau de garde la concentration des trous augmente rapidement et la concentration des électrons diminue.

La figure 3.29 présente le profil du potentiel de la structure de la figure 3.26 après une ligne de coupe à 0.1 μm de la surface. Le potentiel décroît ensuite il se stabilise. Ces variations sont suivies par une augmentation.

La figure 3.30 présente le profil du champ électrique de la structure de la figure 3.26 après une ligne de coupe à 0.1 μm . On observe une diminution et augmentation de champ électrique avec une phase stationnaire entre les deux variations.

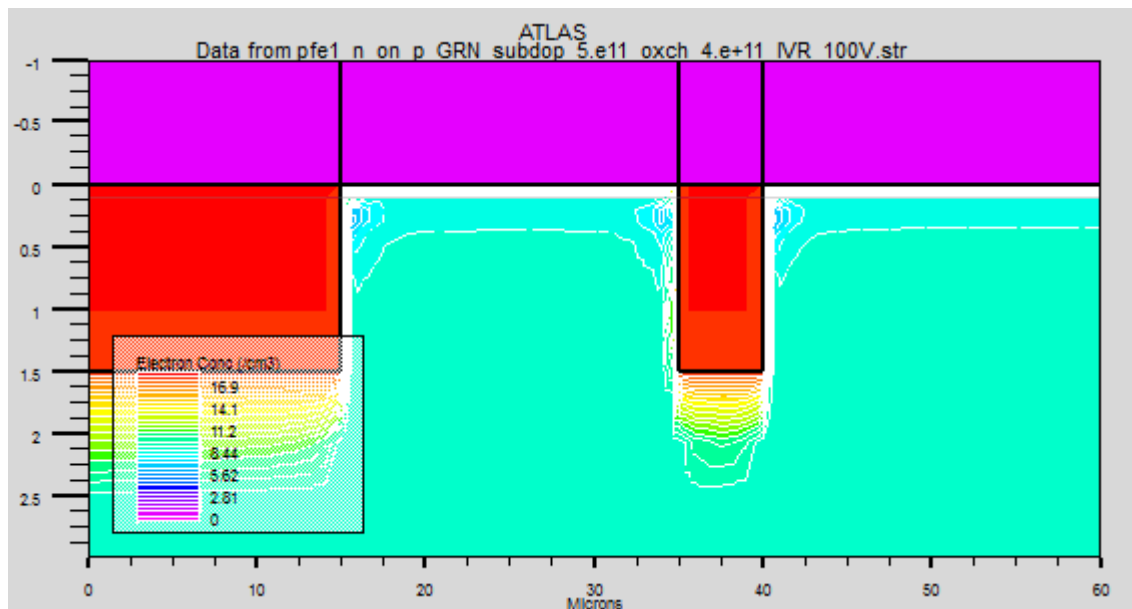


Figure 3.27 Vue schématique de la structure n-on-p-GRN avec le premier anneau de garde montrant le profil de la concentration des électrons sous une tension de 100V.

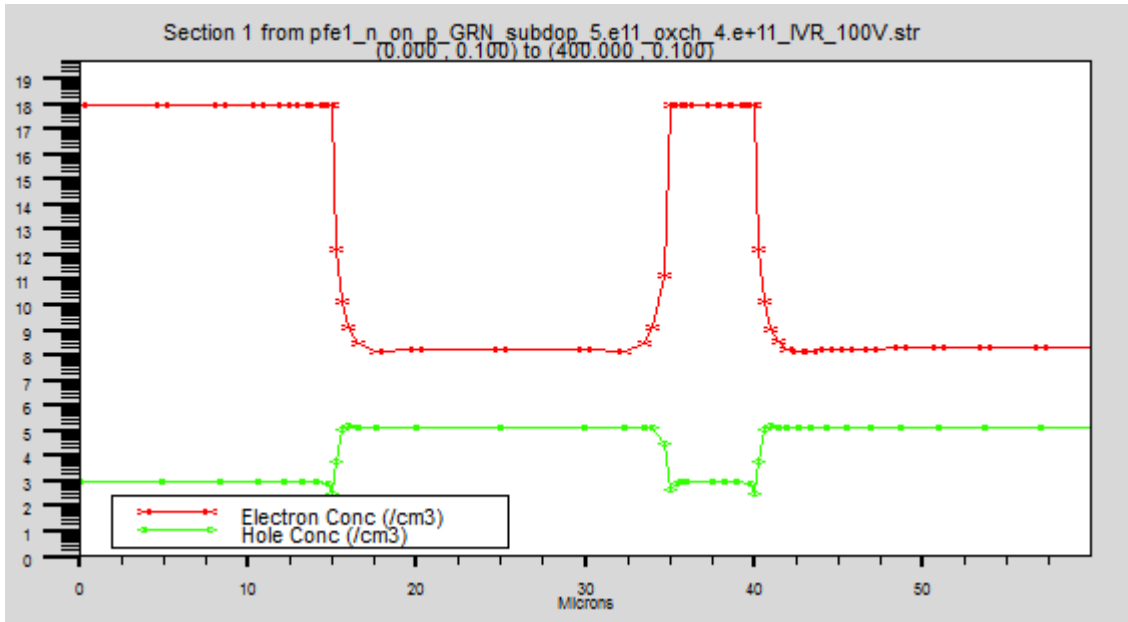


Figure3.28 Profil de la concentration des électrons et des trous de la structure de la figure 3.27 après une ligne de coupe à 0.1µm de la surface

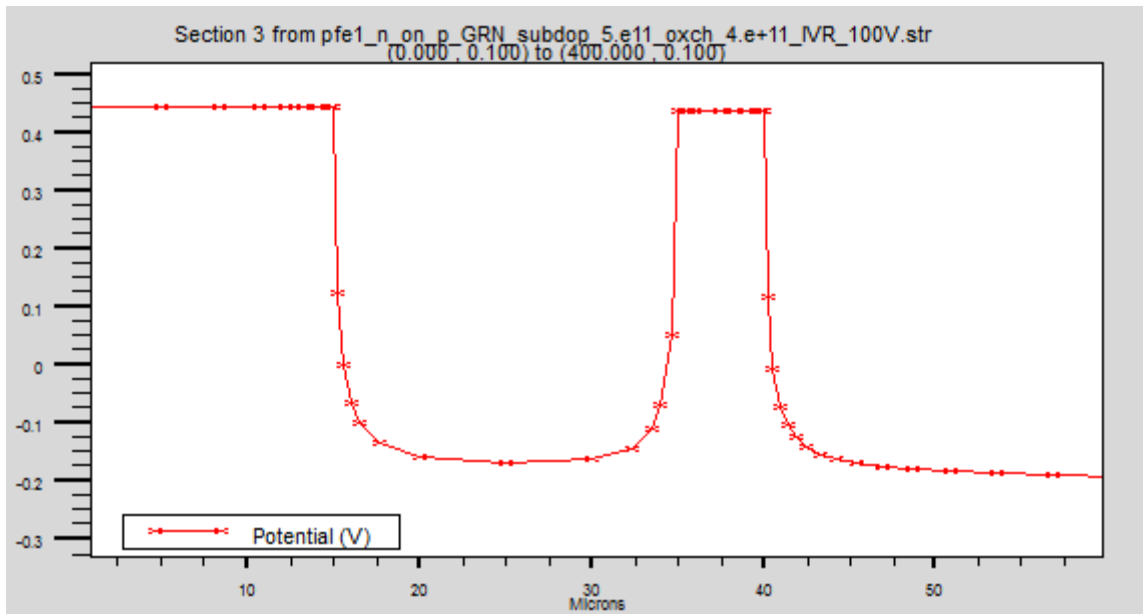


Figure3.29 Profil du potentiel de la structure de la figure 3.27 après une ligne de coupe à 0.1µm de la surface.

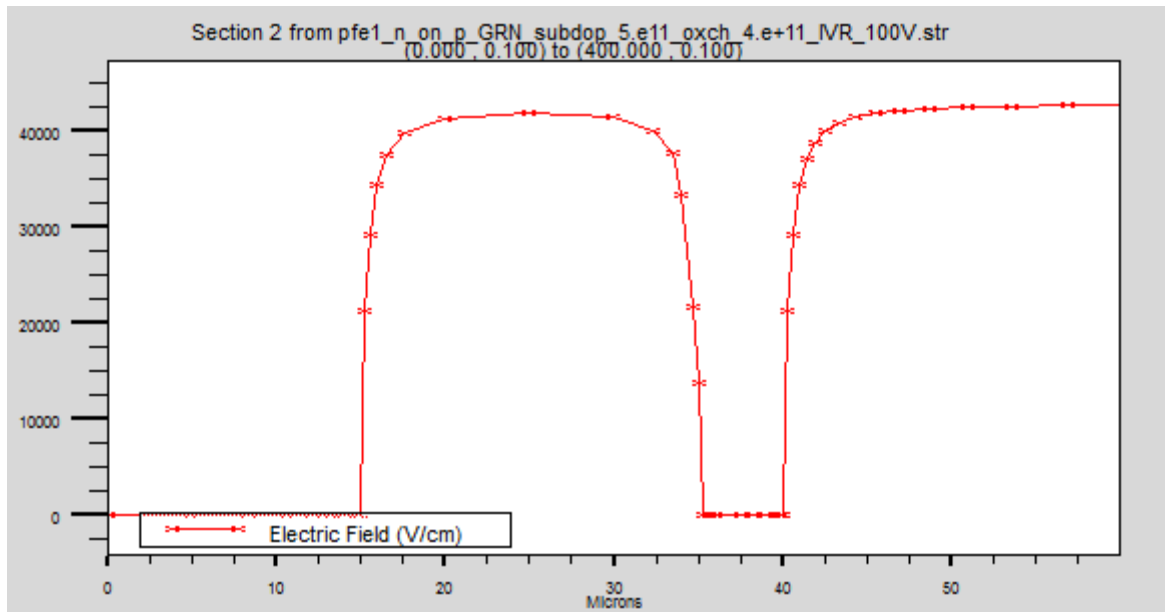


Figure3.30 Profil du champ électrique de la structure de la figure 3.27 après une ligne de coupe à 0.1µm de la surface

La figure 3.31 présente les différentes caractéristiques courant-tension avec charge dans l'oxyde pour la structure n-on-p-GRP et la structure n-on-p-GRN (avec p-spray et sans p-spray).

Ces caractéristiques I-V montrent clairement que la tension de claquage augmente de 900V pour la structure n-on-p-GRN avec p-spray et de 1100V pour la structure n-on-p-GRP tandis que la structure n-on-p-GRN sans p-spray a continué d'augmenter jusqu'au 2700V.

Le courant de fuite, pour une tension de 500V augmente brusquement de 2nA/µm à 2,4nA/µm, lorsque en passe de la structure n-on-p-GRP à la structure n-on-p-GRN (avec p-spray), et reste constante pour la structure (sans p-spray).

La figure 3.32 présente le champ électrique avec charges de l'oxyde, pour une tension de 100V. On remarque que le champ électrique est plus intense dans la structure n-on-p-GRP tendit qu'elle diminue pour la structure n-on-p-GRN (sans p-spray) et très faible pour la structure n-on-p-GRN(avec p-spray).

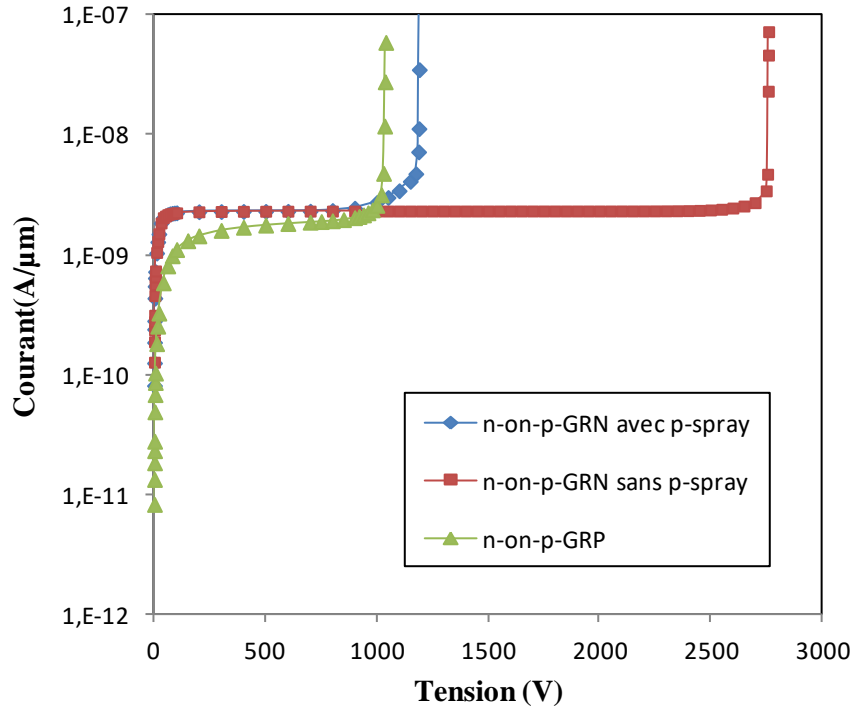


Figure3.31 Caractéristiques courant-tension de différente structure avec charges de l'oxyde.

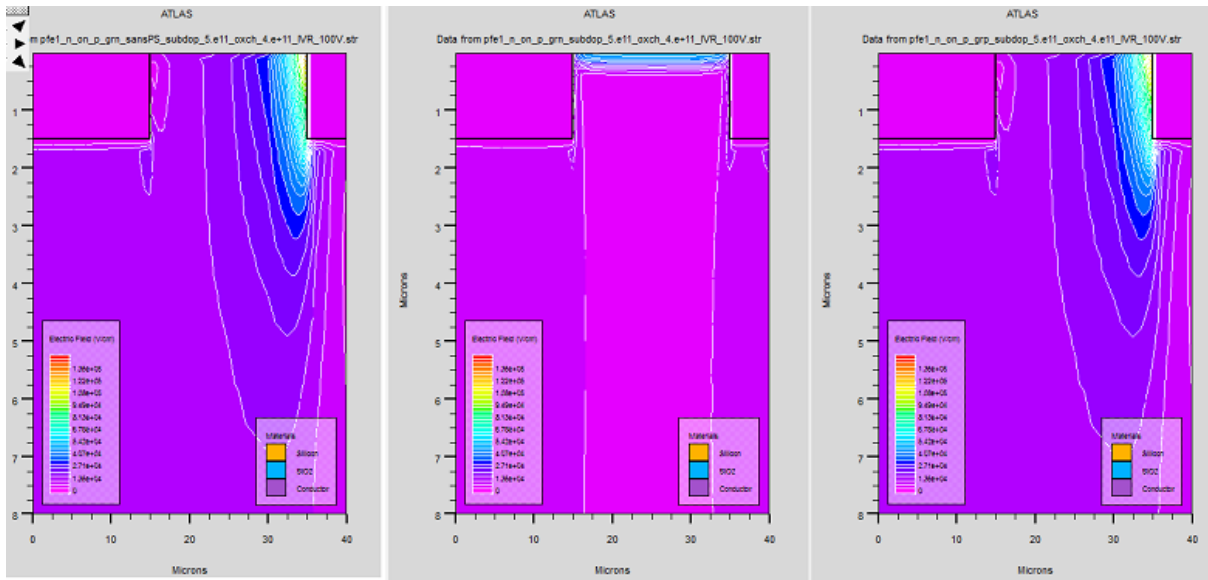


Figure3.32 Le champ électrique de différentes structures avec charges de l'oxyde sous une de polarisation de 100V.

3.5 Effet des paramètres technologiques sur les caractéristiques électriques sous irradiation

3.5.1 Influence des pièges dans la bande interdite

a Structure avec anneaux de garde de type p

La figure 3.33 présente les différentes caractéristiques courant-tension de la structure n-on-p-GRP pour différentes valeurs de radiation, à une charge constante de $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ qui sont: $2 \times 10^{14} \text{ neq/cm}^2$, $6 \times 10^{14} \text{ neq/cm}^2$ et $1 \times 10^{15} \text{ neq/cm}^2$.

Ces caractéristiques I-V montre clairement que la tension de claquage diminue de 640 V à 420V, Lorsque l'influence des radiations augment de $2 \times 10^{14} \text{ neq/cm}^2$ à $6 \times 10^{14} \text{ neq/cm}^2$ et a $1 \times 10^{15} \text{ neq/cm}^2$ la tension de claquage descend rapidement jusqu'à 380 V.

Le courant de fuite, pour une tension de 400V prend une valeur de $2,8 \text{ nA}/\mu\text{m}$ ce dernier augmente brusquement de $3,6 \text{ nA}/\mu\text{m}$ à $5,1 \text{ nA}/\mu\text{m}$, lorsque l'influence varie de $6 \times 10^{14} \text{ neq/cm}^2$ à $1 \times 10^{15} \text{ neq/cm}^2$.

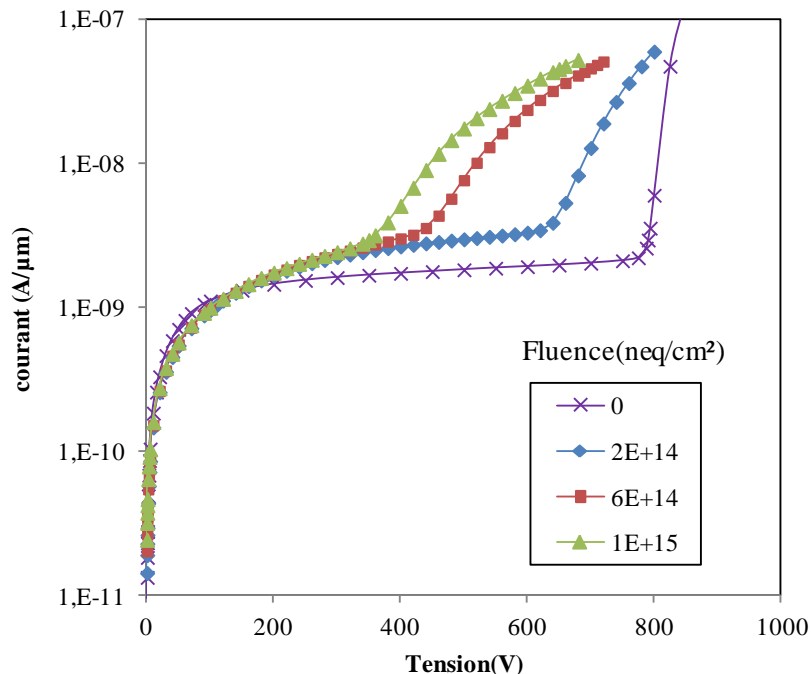


Figure 3.33 Caractéristiques courant-tension de la structure n-on-p-GRP pour différentes valeurs de fluence après charge dans l'oxyde de $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

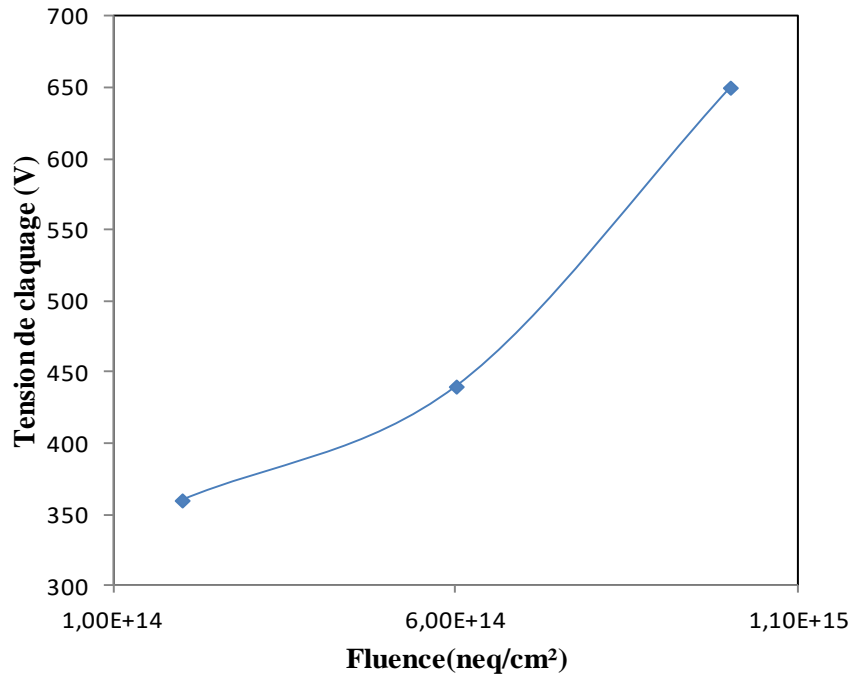


Figure3.34 Variation de la tension de claquage en fonction de la fluence structure n-on-p-GRP.

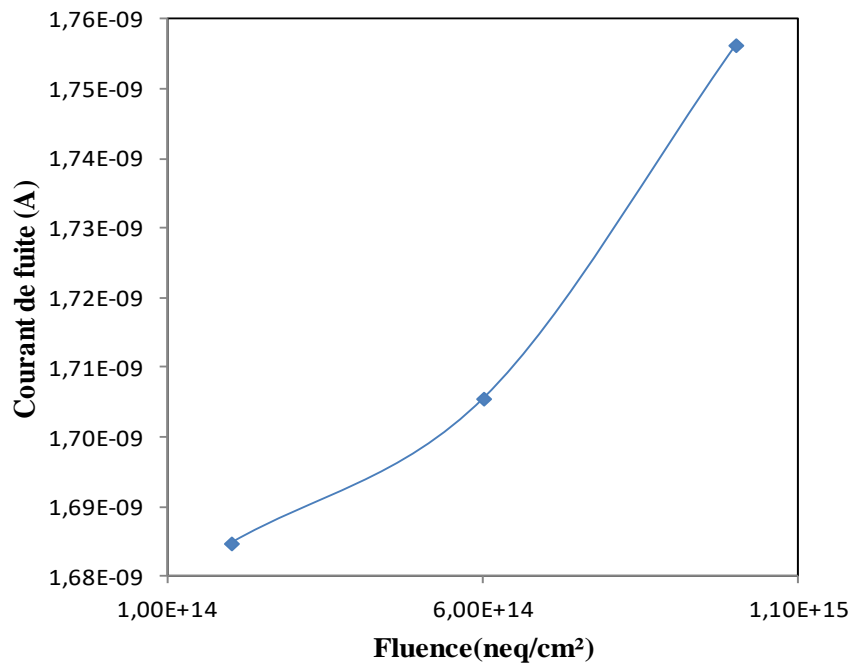


Figure3.35 Variation du courant de fuite en fonction de la fluence structure n-on-p-GRP.

b Structure avec anneaux de garde de type n avec p-spray

La figure 3.36 présente les différentes caractéristiques courant-tension de la structure n-on-p-GRN avec p-spray pour différentes fluences de radiation (2×10^{14} neq/cm², 6×10^{14} neq/cm² et 1×10^{15} neq/cm²) et une charge constante de l'oxyde de 1×10^{12} cm⁻².

Ces caractéristiques I-V montrent clairement que la tension de claquage diminue de 3725 V à 3420V lorsque la fluence augmente de 2×10^{14} neq/cm² à 6×10^{14} neq/cm² et à 1×10^{15} neq/cm² la tension de claquage descend rapidement jusqu'à 2900 V.

Le courant de fuite, pour une tension de 1000V prend une valeur de 5,3nA/μm ce dernier augmente brusquement de 11,3nA/μm à 17nA/μm, lorsque les radiations varie de 6×10^{14} neq/cm² à 1×10^{15} neq/cm².

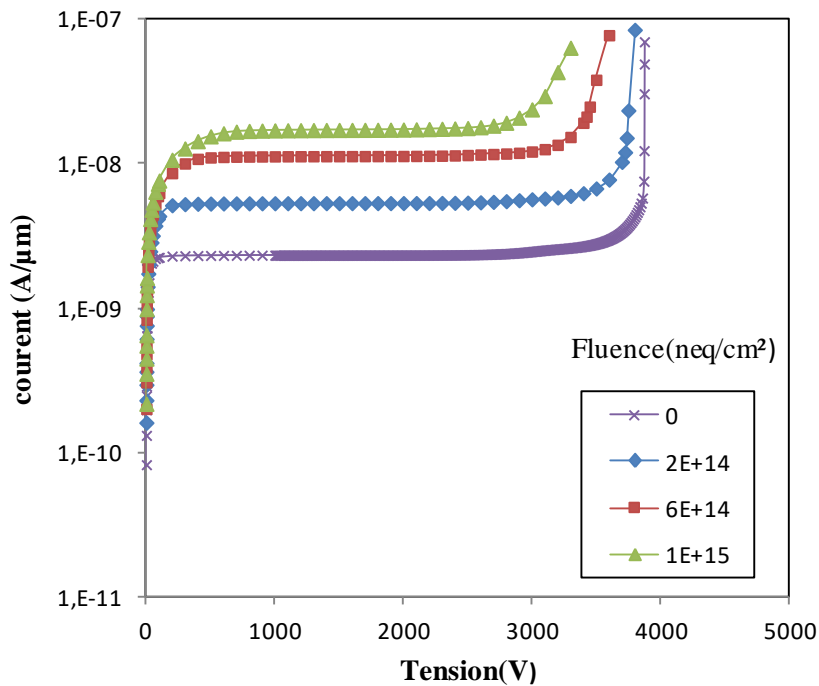


Figure 3.36 Caractéristiques courant-tension de la structure n-on-p-GRN (avec p-spray) pour différentes valeurs de fluence après charge dans l'oxyde de 1×10^{12} cm⁻².

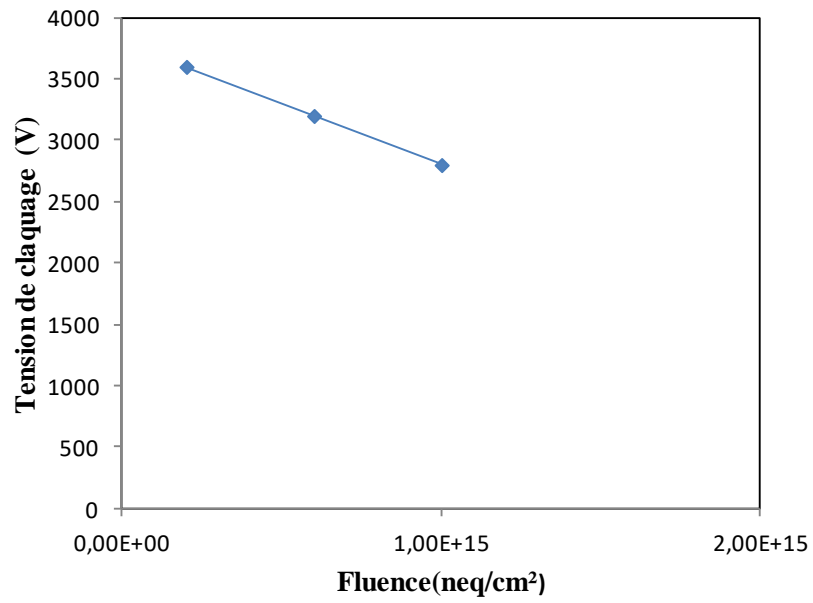


Figure3.37 Variation de la tension de claquage en fonction de la fluence de la structure n-on-p-GRN (avec p-spray).

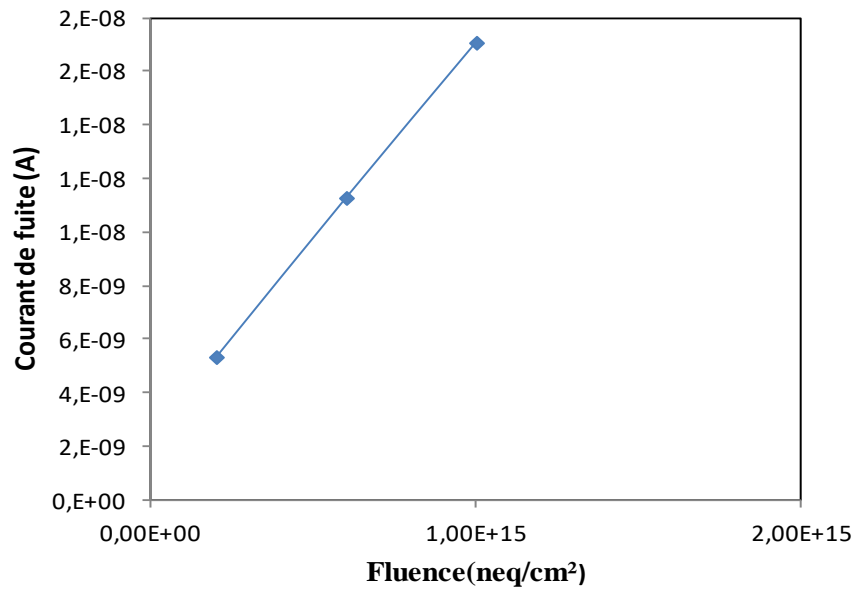


Figure3.38 Variation de courant de fuite en fonction de la fluence n-on-p-GRN (avec p-spray).

3.5.2 Influence des charges dans l'oxyde

a Structure avec anneaux de garde de type p

La figure 3.39 présente les différentes caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de charges d'oxyde, à une fluence constant de $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ qui sont: $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

Ces caractéristiques I-V montrent clairement que la tension de claquage diminue de 580 V à 350V, lorsque la chargeaugment de $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ à $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Et à $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ la tension de claquage diminue rapidement jusqu'à 95 V.

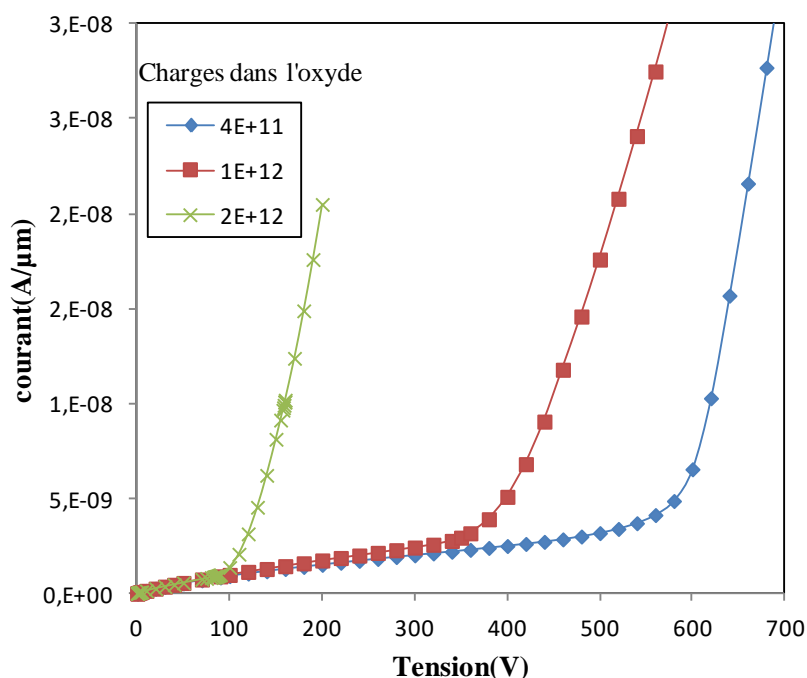


Figure 3.39 Caractéristiques I-V de la structure n-on-p-GRP pour différentes valeurs de la charge dans l'oxyde après une fluence de $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$.

b Structure avec anneaux de garde de type n avec p-spray

La figure 3.40 présente les différentes caractéristiques courant-tension pour différentes valeurs de charges d'oxyde ($4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$, $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$) pour une fluence constante de $1 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$. Ces caractéristiques I-V montrent clairement que la tension de claquage augmente de 600 V à 2900V lorsque la charge varie de $4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ à $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ et à $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ augmente légèrement jusqu'à 3000 V.

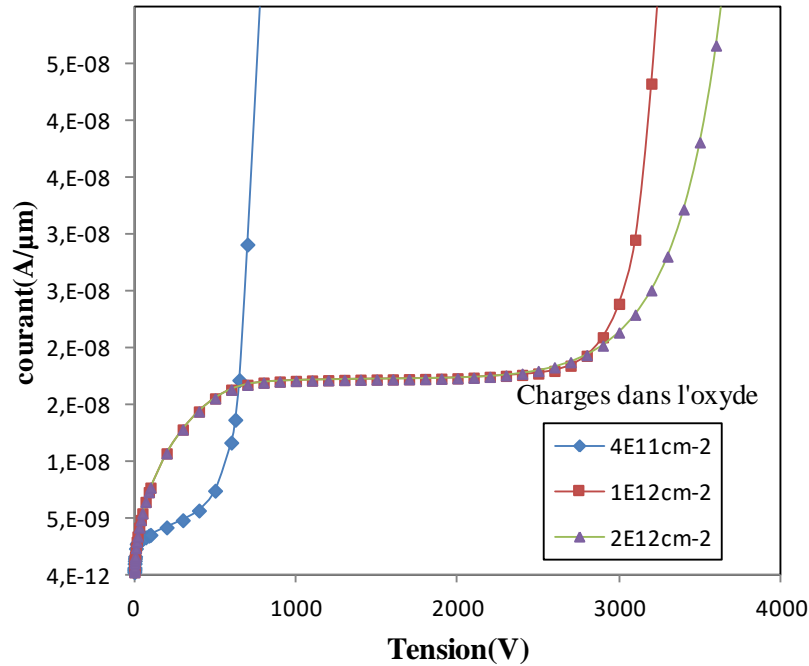


Figure 3.40 Caractéristiques courant-tension de la structure n-on-p-GRN pour différentes valeurs de la charge dans l'oxyde après une fluence de $10^{+15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé un dispositif semi-conducteur dédié à la détection des particules. Cette caractérisation est faite à l'aide de l'outil de simulation ATLAS du logiciel SILVACO. A travers cette simulation nous avons déterminé les performances électriques du dispositif qui est représentée par deux structures différentes de type diode (n-p) avec des anneaux de garde de type p et type n nommée respectivement n-on-p-GRP et n-on-p-GRN. Dans cette étude, nous avons étudié deux performances électriques importantes du dispositif semi-conducteur qui sont : la tension de claquage de la jonction et le courant de fuite circulant dans la structure. Les paramètres technologiques sur lesquels nous avons opéré pour étudier ces performances sont : le substrat, l'oxyde, la jonction de l'anneau de garde et l'effet de radiation.

Les résultats obtenus à travers cette étude montrent que la structure n-on-p-GRN offre de meilleures performances électriques que la structure n-on-p-GRP type en termes de tension de claquage et courants de fuite.

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié les effets des radiations ionisantes sur deux détecteurs à semi-conducteur de type p différents dédiés pour la physique des hautes énergies dans le cadre de l'expérience ATLAS au niveau du CERN à Genève. Le premier détecteur étudié comprend des pixels de type n et des anneaux de garde de type n sur un substrat de type p, nommé, n-on-p-GRN et le deuxième comprend des pixels de type n et des anneaux de garde type p sur un substrat de type p, nommé, n-on-p-GRP.

L'introduction des radiations ainsi que l'analyse des résultats à travers les caractéristiques courant-tension ont été accomplis à l'aide des outils de simulation TCAD du logiciel SILVACO. Ces radiations introduisent trois pièges profonds à l'intérieur de la bande interdite du semi-conducteur, deux sont accepteurs et un piège donneur. De plus une accumulation de charges positive est constatée au niveau de l'oxyde.

Les paramètres concernés dans cette étude sont, le dopage du substrat, la fluence des radiations qui a un impact direct sur la densité des pièges et la charge positive présente dans l'oxyde.

Les résultats obtenus à travers la simulation ont montré que l'augmentation de la fluence fait croître le courant de fuite dans le détecteur et fait chuter considérablement la tension de claquage. Par contre, l'introduction de la charge électrique dans l'oxyde induite de l'irradiation du composant fait augmenter la tension de claquage mais présente une faible influence sur le courant de fuite pour les deux détecteurs. En termes d'étude comparative, le détecteur avec des anneaux de garde

de type n présente de meilleures performances électriques par rapport à celui comportant des anneaux de garde de type p.

Bibliographie

LIVRE

[8] Jean-Pierre Ponpon, "Principe et matériaux pour la détection et l'imagerie des rayonnements nucléaires", Ellipses, 6^{ème} édition, Paris, 2009.

SITE WEB

[11]<https://www.google.dz/search?q=dopage+semi+conducteur&newwindow>.

THESE DE DOCTORAT

[9] T. Ouarda, "Simulation numérique des effets de radiation dans les détecteurs de particules à base de silicium de type p", Thèse pour obtenir le grade de docteur, Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.

MANUEL

[10] "ATLAS User's manual", Silvaco International inc, Device Simulation Software, Juin 2012.

MEMOIRE MAGISTER/MASTER

[1] A.Mehrzi ... "Etude par TCAD-SILVACO d'une structure n-on-p dans le cadre du projet ATLAS du CERN", Mémoire de master, Université Saad Dahleb Blida, 2015

[2] R. Mohamed "Simulation des effets de radiation sur le détecteur des particules à base de silicium par le logiciel TCAD-SILVACO", Mémoire de master, Université Mohamed Khider Biskra, 2013.

[3] A. Dementev "Simulation of new p-type pixel strip detector with enhanced multiplication effect", Mémoire de master, Université Lappenranta, Sweed, 2014.

[4] N. Bokhit ... "Etude par simulation TCAD des performances électriques d'une structure n-in-p dédiée au grand détecteur ATLAS du CERN" Mémoire de master Saad Dahleb Blida ,2016 .

[5] M. Hezabra Adel "Calcul de la résistivité des semi-conducteurs irradiés" , mémoire de magistère , Université Mohamed Khider-Biskra, 2005 .

[6] Y. Marouf, "Modélisation des cellules solaires en InGaN en utilisant Atlas *SILVACO*" , Mémoire de magister, Université Mohamed Khider Biskra, 2013.

PUBLICATION

[12] O.Koybasi, G. Bolla,et D.Bortoletto: « Guard Ring Simulations for n-on-p Silicon Particle Detectors », IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE,2010.

[7] Cinzia DaVia: « Détecteurs au silicium radiorésistants: une solution d'avenir », université Brunei, Royaume-Uni,2003.