

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

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

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

Présenté Par :

HAMMICHE Yahia

&

MAZOUZ Amenallah Abdelmoumene

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique
Spécialité Micro-électronique

THÈME

***Etude de l'effet du type de la couche
d'isolation sur un détecteur de
particules à l'aide des outils de
simulation TCAD-SILVACO***

Encadreur: **Mr. OUSSALAH Slimane**

Co-encadreur : **Mr. NACER Said**

Année Universitaire 2017-2018

REMERCIEMENT

Au terme de ce travail, nous formulons en ces lignes l'expression de nos profondes gratitude à Dieu le Tout Puissant qui nous a aidé à réaliser ce modeste travail.

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à :
Nos parents, qui nous ont préparés le milieu pour la réussite.*

*Notre promoteur **Mr. Slımane OUSSALAH** Maître des recherche A au Centre de Développement des Technologies Avancées (C.D.T.A), à qui nous tenons à assurer également nos sincères et totales gratitude et nos profondes reconnaissances pour avoir dirigé et accordé beaucoup d'intérêt à ce travail, et aussi pour sa qualité humaine.*

***Mr Saıd NACER** enseignant chercheur à l'université de Blıda 1 d'avoir accepté de nous co-encadrer. Ses remarques et ses conseils nous ont été d'une grande utilité pour mener à terme ce travail.*

Les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'apprécier notre travail.

Les enseignants de l'Université de Saad Dahlab de Blıda qui ont veıllés pendant des années à nous former.

Tous ceux qui ont contribué de près ou de loın à l'élaboration de ce modeste travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mon père,

A ma très chère mère,

A mes frères,

A toute ma famille.

A tous mes amis.

A la promotion micro-électronique 2018

Yahia

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mon père,

A ma très chère mère,

A mes frères,

A toute ma famille.

A tous mes amis,

A la promotion micro-électronique 2018

Amenallah

ملخص :

في المشروع نهائية الدراسة ، قمنا بإجراء دراسة أولية باستخدام أدوات برنامج TCAD SILVACO على كاشف الجسيمات نوع مستوي. هذا الأخير مخصص لفيزياء الطاقة العالية كجزء من تجربة CERN ATLAS. تناولت هذه الدراسة تقييم الأداء الكهربائي لثلاثة أنواع من العزل بين البكسلات المسماة p-spray و p-stop و p-moderate. تم تقييم تأثير الشحنة الموجبة الموجودة في أكسيد الكاشف لكل هيكل.

كلمات البحث: كشف مستوي ، والعزلة ، وأشباه الموصلات ، SILVACO

Résumé :

Dans ce projet de fin d'études, nous avons fait une étude préliminaire à l'aide des outils TCAD du logiciel SILVACO sur un détecteur de particules de type planaire. Ce dernier est dédié pour la physique des hautes énergies dans le cadre de l'expérience ATLAS du CERN. Cette étude a concerné l'évaluation des performances électriques pour trois types d'isolation entre les pixels appelés p-spray, p-stop et p-moderate. L'effet de la charge positive présente dans l'oxyde sur le détecteur a été évalué pour chaque structure.

Mots clés: détecteur planaire, isolation, semi-conducteur, SILVACO.

Abstract :

In this project we carried out a preliminary study using SILVACO software TCAD tools on a planar particle detector. The latter is dedicated to high energy physics in the frame of ATLAS experiment of CERN. This study focused on evaluating electrical performance for three types of pixel isolation called p-spray, p-stop and p-moderate. The effect of the positive oxide charges on the detector was evaluated for each structure.

Key words: planar detector, isolation, semiconductor, 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}).
- N_C : Densité effective des états vides dans la bande de conduction.
- N_V : Densité effective des états vides dans la bande de valence.
- 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}).
- q : Charge électrique élémentaire (-1.6×10^{-19}).
- μ_n : Mobilité des électrons ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$).
- μ_p : Mobilité des trous ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$).
- D_n : Coefficient de diffusion des électrons.
- D_p : Coefficient de diffusion des trous.
- kB : Constante de Boltzman ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$).
- V_n : Potentiel (n).
- V_p : Potentiel (p).
- ϵ_0, ϵ_r : Permittivité et permittivité relative.
- V_{bi} : Tension de diffusion.
- V : Tensions appliquées à la structure.
- W : Largeur de la zone de déplétion.
- T : Température (K).

Listes des acronymes et abréviations

DC : Courant directe.

AC : Courant alternative.

BC : Bande de conduction.

BV : Bande de valence.

J_n : Densité du courant des électrons.

J_p : Densité du courant des trous.

e : Charge électrique élémentaire ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$).

i : Courant électrique (A).

E_F : Energie du niveau de Fermi.

E_C : Energie de la bande de conduction.

E_V : Energie de la bande de valence.

E_G : Energie du gap.

E_i : Energie intrinsèque.

m^*_c : Masses effectives des électrons dans la bande de conduction.

m^*_v : Masses effectives des électrons dans la bande de valence

x_n : La largeur de la zone de déplétion du côté N.

x_p : La largeur de la zone de déplétion du côté P

LHC : Large Hadron Collider.

TCAD : Technology Computer Aided Design.

CERN : Organisation européenne pour la recherche nucléaire

Résumé	
Remerciements	
Listes des acronymes et abréviations	
Liste des figures	
Introduction générale.....	01

Chapitre1

1.1	Introduction.....	03
1.2	L'expérience ATLAS.....	03
1.2.1	ATLAS.....	03
1.2.1	LHC.....	04
1.2.2	Le CERN.....	05
1.3	Les semi-conducteurs.....	06
1.3.1	Définition.....	06
1.3.2	Bandes d'énergie.....	06
1.4	Dopage.....	08
1.4.1	Semi-conducteurs intrinsèques.....	08
1.4.2	Semi-conducteurs extrinsèques.....	09
a	Type p.....	09
b	Type n.....	10
1.5	La jonction pn.....	12
1.5.1	Définition.....	12
1.5.2	Jonction pn polarisé en direct.....	13
1.5.3	Jonction pn polarisé en inverse.....	13
1.6	Détecteur à semi-conducteur.....	14
1.6.1	Introduction.....	14
1.6.2	Principe de fonctionnement des détecteurs à semi-conducteurs.....	14
1.7	L'effet des radiation sur un détecteur.....	16
1.7.1	Effet de surface.....	16
1.7.2	Effet de volume.....	18

1.8	Technique d'isolation des pixels.....	18
1.8.1	P-spray.....	18
1.8.2	P-stop.....	19
1.8.3	P-moderate.....	20
1.9	Conclusion.....	21
chapitre 2		
2.1	Introduction.....	23
2.2	Les rôle de la simulation.....	23
2.3	TCAD Silvaco.....	23
2.4	Logiciel de simulation « Silvaco-Atlas ».....	24
2.5	Présentation d'Atlas.....	25
2.5.1	Mode d'opération d'ATLAS.....	26
2.5.2	Simulation du dispositif.....	26
2.5.3	Deckbuild.....	27
2.6	Ordre des commandes.....	28
2.6.1	Spécification de la structure.....	28
a	Maillage.....	28
b	Régions.....	30
c	Electrodes.....	31
d	Dopage.....	32
2.6.2	Modèles des matériaux.....	33
a	Matériaux.....	33
b	Modèle.....	34
c	Contact.....	34
d	Interface.....	34
2.6.3	La méthode de résolution numérique.....	35
a	Méthode numérique.....	35
2.6.4	Les solutions.....	35
a	Log.....	35

b Solve.....	36
c Load et save.....	36
2.6.5 Analyse des résultats.....	36
a EXTRACT.....	36
b TONYPLOT.....	36
2.7 Conclusion.....	37

Chapitre3

3.1 Introduction.....	39
3.2 Structure sans isolation.....	39
3.2.1 Maillage.....	40
3.2.2 Dopage sous ATLAS.....	40
3.2.3 Effet de l'oxyde de charge.....	41
a Zone de charge d'espace.....	41
b Caractéristiques I-V.....	42
c Tension de claquage et courant de fuite.....	43
d Champ électrique.....	44
3.3 Structure p-stop.....	46
3.3.1 Maillage.....	47
3.3.2 Dopage sous ATLAS.....	48
3.3.3 Effet de l'oxyde de charge.....	48
a Zone de charge d'espace.....	48
b Caractéristiques I-V.....	50
c Tension de claquage et courant de fuite.....	51
d Champ électrique.....	52
3.4 Structure p-spray.....	54
3.4.1 Maillage.....	54
3.4.2 Dopage sous ATLAS.....	55
3.4.3 Effet de l'oxyde de charge.....	55
a Zone de charge d'espace.....	55

	b Effet du dopage du p-spray.....	58
	c Tension de claquage et courant de fuite.....	58
	d Concentration des électrons.....	59
	e Champ électrique.....	59
3.5	Structure p-moderate.....	60
3.5.1	Maillage.....	60
3.5.2	Dopage sous ATLAS.....	61
3.5.3	Effet de l'oxyde de charge.....	61
	a Zone de charge d'espace.....	61
	b Caractéristiques I-V.....	63
	c Tension de claquage et courant de fuite.....	64
	d Champ électrique.....	65
3.6	Etude comparative.....	67
3.7	Conclusion.....	69
	Conclusion générale.....	70
	Références bibliographiques.....	71

Figure 1.1 : Schéma Atlas.....	4
Figure 1.2 : Schéma représentant le LHC.....	5
Figure 1.3 : Diagrammes énergétiques pour les trois types de matériaux	7
Figure 1.4 : Représentation schématique des liaisons électroniques pour un semi-conducteur intrinsèque (Si).....	9
Figure 1.5 : Silicium dopé au bore.....	10
Figure 1.6 : Silicium dopé au phosphore.....	11
Figure 1.7 : La jonction p-n.....	12
Figure 1.8 : Représentation de la polarisation directe.....	13
Figure 1.9 : Représentation de la polarisation inverse.....	14
Figure 1.10 : Principe de la détection dans un détecteur à semi-conducteur.....	16
Figure 1.11 : Représentation schématique des effets de surface dans un dioxyde de silicium subissant une interaction ionisante.....	17
Figure 1.12 : Schéma de p-spray.....	19
Figure 1.13 : Schéma de p-stop.....	20
Figure 1.13 : Schéma de moderate.....	20
Figure 2.1 : Le rôle de la simulation.....	23
Figure 2.2 : Environnement virtuel de fabrication des plaquettes de silicium.....	24
Figure 2.3 : Les entrées et sorties du ATLAS.....	26
Figure 2.4 : Le logiciel Silvaco en cours d'exécution.....	27
Figure 2.5 : Les groupes et sous-groupes dans ATLAS.....	28
Figure 2.6 : Définition du maillage avec Atlas.....	29
Figure 2.7 : Définition des régions avec Atlas.....	30
Figure 2.8 : Définition des électrodes (anode et la cathode) avec Atlas.....	32
Figure 2.9 : Profil du dopage.....	33
Figure 2.10 : L'environnement TONYPLOT.....	37

Figure 3.1 : Représentation schématique de la structure sans-isolation.....	39
Figure 3.2 : Schéma de maillage de structure	40
Figure 3.3 : Représentation schématique de dopage sous ATLAS.....	40
Figure 3.4 : Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure sans charges dans l'oxyde.....	41
Figure 3.5 : Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure avec une charge dans l'oxyde de 10^{+12} cm^{-2}	42
Figure 3.6 : Caractéristique I-V de la structure sans-isolation.....	43
Figure 3.7 : Variation de la tension de claquage et du courant de fuite en fonction de la charge dans l'oxyde.....	43
Figure 3.8 : Représentation du champ électrique dans la structure (en haut) et son profil (en bas) avec une ligne de découpe au milieu du pixel sans charges dans l'oxyde.....	44
Figure 3.9 : Représentation du champ électrique dans la structure (en haut) et son profil (en bas) avec une ligne de découpe au milieu du pixel avec une charge dans l'oxyde de 10^{+12} cm^{-2}	45
Figure 3.10 : Représentation schématique de la structure p-stop.....	46
Figure 3.11 : Schéma de maillage de structure.....	47
Figure 3.12 : Représentation schématique de dopage sous ATLAS.....	48
Figure 3.13 : Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure sans charges dans l'oxyde.....	49
Figure 3.14 : Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure avec une charge dans l'oxyde de 10^{+12} cm^{-2}	50
Figure 3.15 : Caractéristique I-V de la structure p-stop.....	51
Figure 3.16 : Variation de la tension de claquage et courant de fuite en fonction de la charge de l'oxyde.....	51
Figure 3.17 : Représentation du champ électrique dans la structure (en haut) et son profil (en bas) avec une ligne de découpe au milieu du pixel sans charges dans l'oxyde.....	52
Figure 3.18 : Représentation du champ électrique dans la structure (en haut) et son profil (en bas) avec une ligne de découpe au milieu du pixel avec une charge dans l'oxyde de 10^{+12} cm^{-2}	53
Figure 3.19 : Représentation schématique de la structure p-spray.....	54
Figure 3.20 : Schéma de maillage de structure.....	54
Figure 3.21 : Représentation schématique de dopage p-spray sous ATLAS.....	55

Figure 3.22 : Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure sans charges dans l'oxyde.....	56
Figure 3.23 : Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure avec une charge dans l'oxyde de 10^{+12} cm^{-2}	57
Figure 3.24 : Caractéristique I-V de la structure p-spray pour différentes valeurs de dopage du p-spray.....	58
Figure 3.25 : Evolution de la tension de claquage et du courant de fuite en fonction du dopage du p-spray.....	58
Figure 3.26 : Profil de la concentration des électrons.....	59
Figure 3.27 : Profil du champ électrique.....	59
Figure 3.28 : Représentation schématique de la structure sans-isolation.....	60
Figure 3.29 : Schéma de maillage de structure.....	60
Figure 3.30 : Représentation schématique de dopage sous ATLAS.....	61
Figure 3.31 : Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure sans charges dans l'oxyde.....	62
Figure 3.32 : Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure avec une charge dans l'oxyde de 10^{+12} cm^{-2}	63
Figure 3.33 : Caractéristiques I-V de la structure moderate pour différentes charges dans l'oxyde.....	64
Figure 3.34 : Variation de la tension de claquage (à gauche) et du courant de fuite (à droite) en fonction de la charge dans l'oxyde.....	64
Figure 3.35 : Représentation du champ électrique dans la structure (en haut) et son profil (en bas) avec une ligne de découpe au milieu du pixel sans charges dans l'oxyde.....	65
Figure 3.36 : Représentation du champ électrique dans la structure (en haut) et son profil (en bas) avec une ligne de découpe au milieu du pixel avec charges dans l'oxyde.....	66
Figure 3.37 : Représentation des caractéristiques I-V pour les différentes structures pour une charge d'oxyde de 10^{+12} cm^{-2} : sans isolation, p-stop, p-spray et moderate.....	67
Figure 3.38 : Représentation de la concentration des électrons dans les différentes structures pour une tension de polarisation de 100V. a) sans isolation, b) p-stop, c) p-spray et d) moderate.....	68
Figure 3.39 : Représentation du profil de la concentration des électrons selon l'axe des x à une distance de 0.1 μm en dessous de l'interface Si/SiO ₂ dans les différentes structures pour	

une tension de polarisation de 100V et une charge de 10^{+12} cm^{-2}	68
Figure 3.40 : Représentation du champ électrique selon l'axe des x à une distance de 0.1 μm en dessous de l'interface Si/SiO ₂ dans les différentes structures pour une tension de polarisation de 100V et une charge de 10^{+12} cm^{-2}	69

Introduction générale

Dans le cadre des expériences en physique des hautes énergies, comme celle de l'expérience ATLAS au niveau du CERN, les mesures des traces de particules demandent des détecteurs très sophistiqués pour réagir avec les particules. Dans le passé, ces détecteurs sont fabriqués à base de matériaux solides qui ne fonctionnent qu'aux basses températures, ce qui nécessite des systèmes de refroidissement compliqués et coûteux. Actuellement, les recherches sont dirigées vers le développement des détecteurs à base de semi-conducteurs pour leur grande précision de mesure et leur simplicité de fabrication.

L'utilisation des technologies de la microélectronique pour la réalisation de ces détecteurs donne une possibilité d'intégration et une production à faible coût. Les simulateurs TCAD (Technology Computer-Aided Design) permettent la modélisation du comportement physique et électrique d'un composant électronique, dans le but d'économiser le temps et le coût de développement, et ainsi de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs. Les simulateurs existants sur le marché (ISE, SYNOPSIS, SILVACO,...) ont le même principe de fonctionnement.

Notre travail consiste à étudier l'effet des différents types des couches d'isolation sur les performances électriques d'un détecteur de particules à l'aide des outils TCAD-SILVACO.

Notre mémoire est composé de trois chapitres. Dans le premier chapitre nous présentons un rappel théorique sur la physique des semi-conducteurs, le principe de détection dans les détecteurs à semi-conducteurs ainsi que les différents types d'isolation entre les pixels. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation du logiciel de simulation Atlas de la société SILVACO, où nous présentons son principe et son mode de fonctionnement ainsi que ses principales commandes. Dans le dernier chapitre, nous exposerons nos résultats issus de cette étude sur les performances électriques d'un détecteur planaire en fonction des charges positives présentes dans l'oxyde pour les différents types d'isolation entre les pixels. Enfin, nous terminons par une conclusion générale.

Chapitre 1

Les détecteurs à base de semi- conducteur

1.1. Introduction

L'étude des plus petits constituants de la matière et les particules subatomiques invisibles, représente un sujet actuel de la physique expérimentale. Les mesures dans ce domaine peuvent aider à comprendre les différentes et essentielles propriétés de ces particules comme le reste de la masse, la charge, les spins et leurs interactions. Pour pénétrer dans les niveaux profonds de la matière on utilise des accélérateurs de particules à haute énergie, comme le (L H C) Large Hadron Collider au CERN.

1.2. L'expérience ATLAS

1.2.1. ATLAS

ATLAS est l'un des deux détecteurs polyvalents du Grand collisionneur de hadrons (LHC) [1]. Il étudie des domaines de physique très variés, de la recherche du boson de Higgs aux dimensions supplémentaires de l'espace-temps, en passant par les particules qui pourraient former la matière noire. Les faisceaux de particules du LHC entrent en collision au centre du détecteur ATLAS. Les débris de collision ainsi produits forment de nouvelles particules, qui émergent du point de collision dans toutes les directions. Six sous-systèmes de détection différents disposés en couches autour du point de collision enregistrent la trajectoire, l'impulsion et l'énergie des particules, ce qui permet d'identifier chacune d'elles. Un énorme système d'aimants permet d'incurver la trajectoire des particules et, ainsi, de mesurer leur impulsion. Les interactions produites dans les détecteurs d'ATLAS créent un énorme flux de données. Pour assimiler ces données, ATLAS utilise un système de déclenchement de pointe, qui indique au détecteur les événements devant être enregistrés et ceux devant être ignorés. Des systèmes complexes d'acquisition de données et de calcul sont ensuite utilisés pour analyser les événements enregistrés. Mesurant 46 m de long, 25 m de haut et 25 m de large, et pesant 7000 tonnes, le détecteur ATLAS est le détecteur de particules le plus volumineux jamais construit. Il se situe dans une caverne, à 100 m sous terre, à proximité du site principal du CERN et de la commune de Meyrin, en Suisse. Plus de 3000 scientifiques issus de 174 instituts, représentant pas moins de 38 pays, travaillent sur l'expérience ATLAS (février 2012).

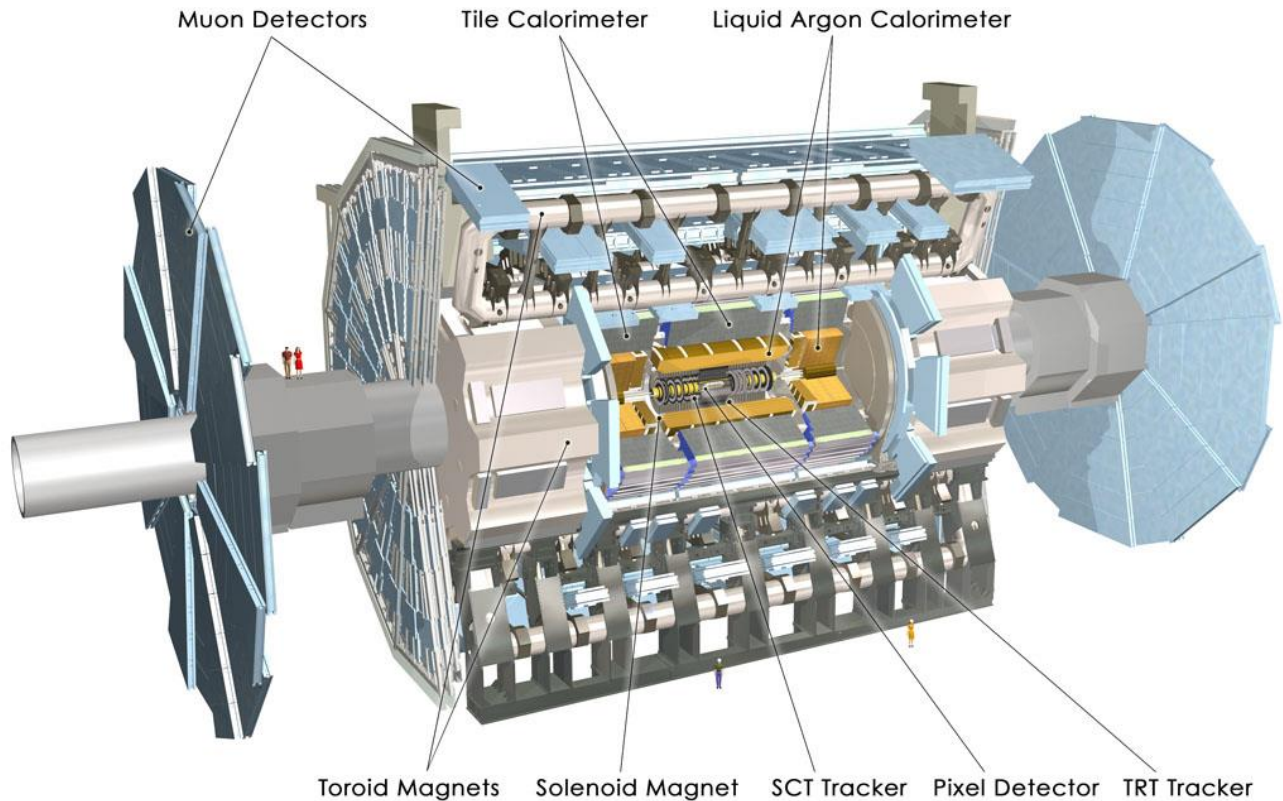


Figure 1.1 Schema Atlas

1.2.2. LHC

Le Grand Collisionneur de Hadrons (Large Hadron Collider ; LHC) vient d'entrer en fonctionnement. Il est situé dans un anneau de 27 kilomètres et enterré à 100 m sous terre à la frontière franco-suisse, près de Genève. Le LHC est désormais le plus puissant des accélérateurs de particules au monde. Des protons (ou des ions) de très haute énergie circulant dans deux faisceaux tournants à contre-sens se choquent les uns contre les autres, dans le but de rechercher des indices de la super symétrie, de la matière noire et de l'origine de la masse des particules élémentaires. Les faisceaux se composent des paquets contenant des centaines de milliards de protons chacun. Voyageant quasiment à la vitesse de la lumière, ils sont injectés, accélérés, et maintenus en circulation pendant des heures, guidés par des milliers d'aimants supraconducteurs puissants. Dans la majeure partie de l'anneau, les faisceaux voyagent dans deux lignes sous vide séparées, mais en quatre points d'interactions, ils se heurtent au cœur des expériences principales,

Chapitre 1: les détecteurs à base de semi-conducteur

appelées Atlas, CMS, Alice et LHCb. L'énergie des protons (ou des ions) est transformée au moment du choc en une myriade de particules exotiques, que les détecteurs de ces quatre expériences observent avec attention. Les détecteurs pourront voir jusqu'à 600 millions de collisions par seconde et les expériences scrutent déjà les données pour y déceler les signes d'événements extrêmement rares, tels que la création du très recherché boson de Higgs.

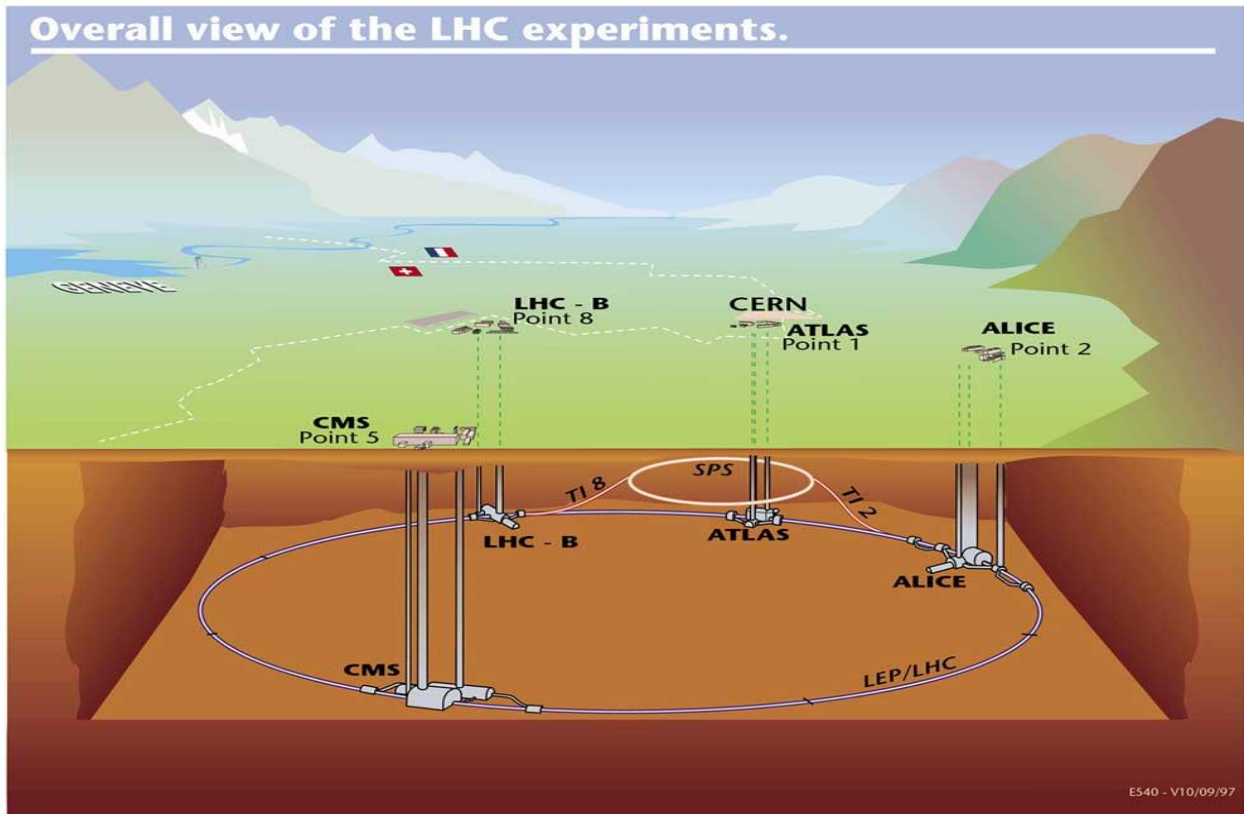


Figure 1.2 Schema représentant le LHC

1.2.3. CERN

Le CERN, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, est l'un des plus grands et des plus prestigieux laboratoires scientifiques du monde. Il a pour vocation la physique fondamentale, la découverte des constituants et des lois de l'Univers. Il utilise des instruments scientifiques très complexes pour sonder les constituants ultimes de la matière : les particules fondamentales. En étudiant ce qui se passe lorsque ces particules entrent en collision, les physiciens appréhendent les lois de la Nature. Les instruments qu'utilise le CERN sont des accélérateurs et des détecteurs de

Chapitre 1: les détecteurs à base de semi-conducteur

particules. Les accélérateurs portent des faisceaux de particules à des énergies élevées pour les faire entrer en collision avec d'autres faisceaux ou avec des cibles fixes. Les détecteurs, eux, observent et enregistrent le résultat de ces collisions. Fondé en 1954, le CERN est situé de part et d'autre de la frontière franco-suisse, près de Genève. Il a été l'une des premières organisations à l'échelle européenne et compte aujourd'hui 22 États_membres. Pour plus d'informations sur la gouvernance et l'organisation du CERN.

1.3. Les semi-conducteurs

1.3.1. Définition

Un semi-conducteur est un matériau se situant entre le conducteur et l'isolant. Un semi-conducteur à l'état pur (intrinsèque) n'est pas un bon conducteur ni un bon isolant. Les éléments uniques les plus utilisés pour semi-conducteurs sont le Silicium, et le Germanium et le Carbone [2].

Le comportement électrique des semi-conducteurs est généralement modélisé à l'aide de la théorie des bandes d'énergie. Selon celle-ci, un matériau semi-conducteur possède une bande interdite suffisamment petite pour que des électrons de la bande de valence puissent facilement rejoindre la bande de conduction. Si un potentiel électrique est appliqué à ses bornes, un faible courant électrique apparaît, provoqué à la fois par le déplacement des électrons et par celui des « trous » qu'ils laissent dans la bande de valence.

La conductivité électrique des semi-conducteurs peut être contrôlée par dopage, en introduisant une petite quantité d'impuretés dans le matériau afin de produire un excès d'électrons ou un déficit. Des semi-conducteurs dopés différemment peuvent être mis en contact afin de créer des jonctions, permettant de contrôler la direction et la quantité de courant qui traverse l'ensemble. Cette propriété est à la base du fonctionnement des composants de l'électronique moderne : diodes, transistors, etc.

1.3.2. Bandes d'énergie

la couche de valence d'un atome représente une bande d'un certain niveau énergétique et que les électrons de valence sont confinés à cette bande. Lorsqu'un électron acquiert assez d'énergie additionnelle d'une source externe, il peut quitter la couche de valence, devenir un électron libre et exister dans ce que l'on désigne comme étant la bande de conduction. En terme d'énergie, la

Chapitre 1: les détecteurs à base de semi-conducteur

différence entre la bande de valence et la bande de conduction est appelée un écart énergétique. Il s'agit en fait de la quantité d'énergie que doit avoir un électron pour sauter de la bande de valence vers la bande de conduction. Une fois dans la bande de conduction, l'électron est libre de se déplacer à travers le matériau et n'est plus lié à aucun atome particulier. La figure(1.1) montre les diagrammes d'énergie pour un isolant, un semi-conducteur et un conducteur. Notez à la partie a) le vaste écart énergétique entre les bandes. Les électrons de valence ne peuvent sauter vers la bande de conduction sauf lors d'une détérioration provoquée par des tensions extrêmement élevées appliquées au matériau. À la partie b), on remarque qu'un semi-conducteur possède un écart énergétique plus restreint, permettant à quelques électrons de sauter vers la bande de conduction et de devenir des électrons libres. Par contraste, la partie c) illustre les bandes énergétiques se chevauchant dans un conducteur. Dans un matériau conducteur, il existe toujours un grand nombre d'électrons libres.

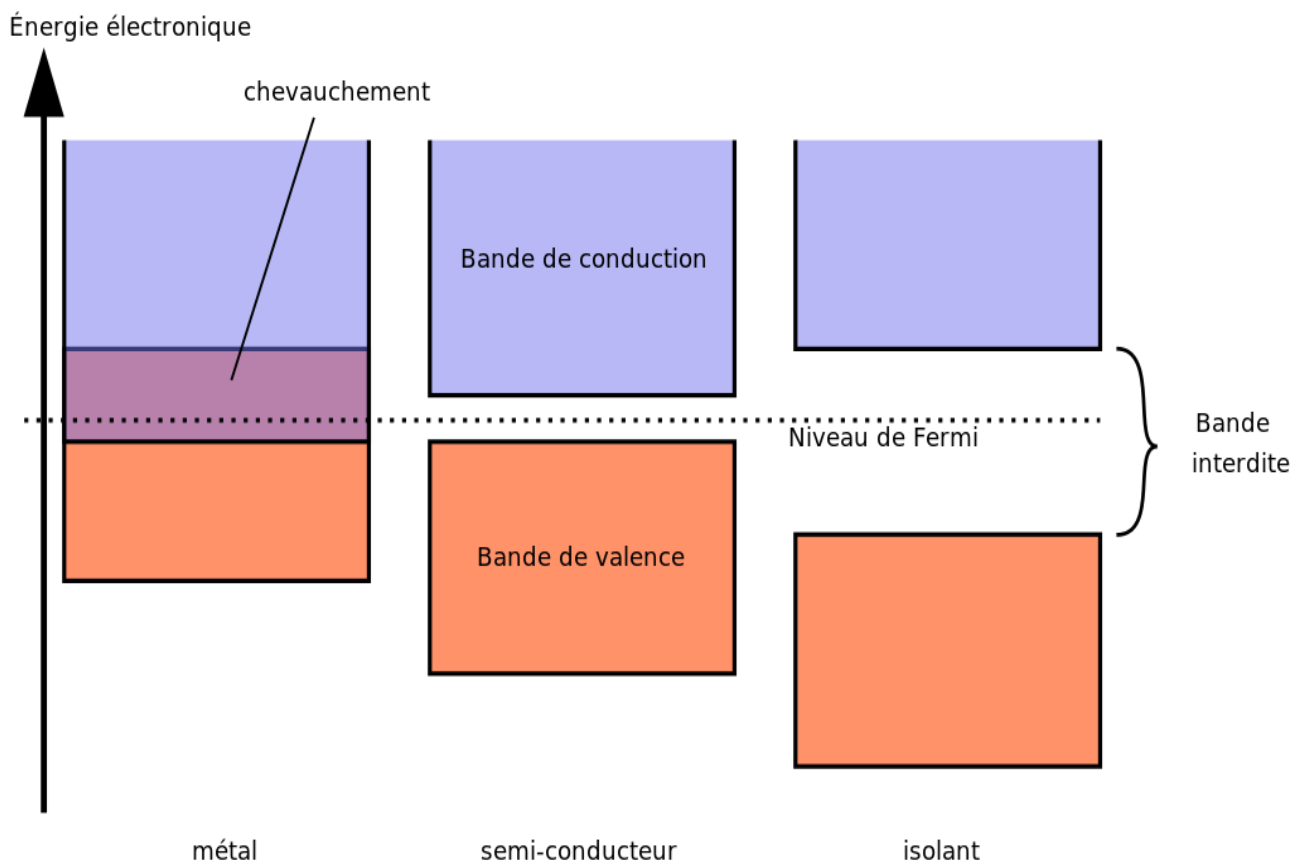


Figure 1.3 Diagrammes énergétiques pour les trois types de matériaux.

1.4. Dopage

1.4.1. Semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur dit intrinsèque est un matériau idéal ne possédant ni défaut physique ni défaut chimique. Il est un semi-conducteur dépourvu de toute impureté susceptible de modifier la densité de porteurs. Les électrons de la bande de conduction ne peuvent résulter que de l'excitation thermique d'électrons liés de la bande de valence. On peut définir le semi-conducteur intrinsèque comme il est un semi-conducteur non dopé, c'est à dire qu'il contient peu d'impuretés en comparaison avec la quantité de trous et d'électrons générés thermiquement.

Pour mieux appréhender le comportement des semi-conducteurs, nous devons étudier plus en détail les populations d'électrons et de trous dans chacune des bandes de conduction et de valence. Aussi, nous allons réaliser un bilan électronique des semi-conducteurs intrinsèques. Pour ce faire, nous devons introduire la notion de densité d'états énergétique $N(E)$. Cette grandeur, dépendante de l'énergie électronique E , correspond à la place disponible pour les électrons dans la bande de conduction $N_c(E)$ et à la place disponible pour les trous dans la bande de valence $N_v(E)$. Pour des énergies proches des extrema de ces deux bandes, son tracé est parabolique :

$$N_c(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_c}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{E - E_c} \quad (1.1)$$

$[cm^{-3}/eV]$

$$N_v(E) = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_v}{\hbar^2} \right)^{3/2} \sqrt{E_v - E} \quad (1.2)$$

La figure 1.4 montre que pour un semi-conducteur intrinsèque (sans impuretés), à chaque électron de la bande de conduction correspond un trou dans la bande de valence. De cette constatation, nous déduisons que les densités d'électrons et de trous sont identiques pour ce type de semi-conducteur.

$$n = p = n_i(T) = AT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right) \quad (1.3)$$

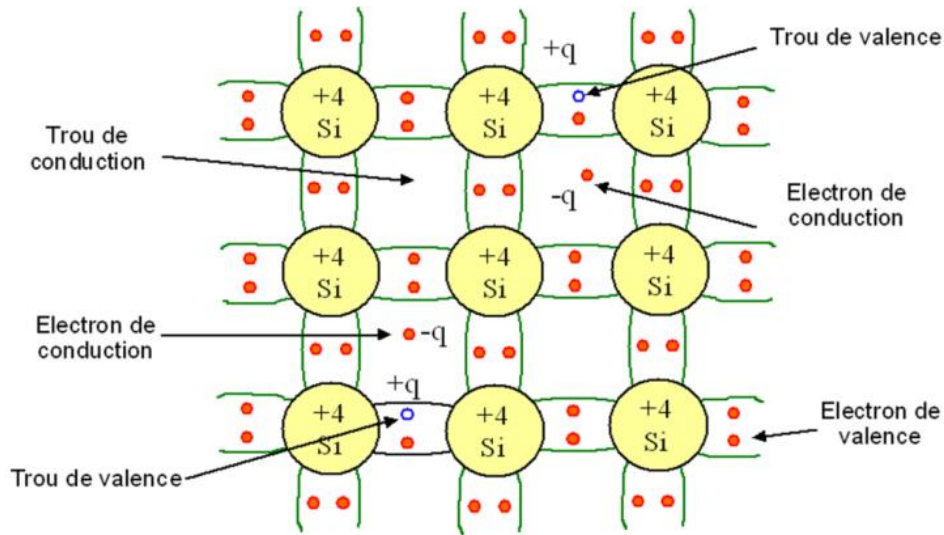


Figure 1.4 Représentation schématique des liaisons électroniques pour un semi-conducteur intrinsèque (Si).

1.4.2. Semi-conducteurs extrinsèques

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés spécifiques lui conférant des propriétés électriques adaptées aux applications électroniques (diodes, transistors, etc...) et optoélectroniques (émetteurs et récepteurs de lumière, etc...).

a Type p

Un semi-conducteur type p est un semi-conducteur intrinsèque (ex: silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type accepteurs (ex: Bohr B). Ces impuretés sont ainsi appelées parce qu'elles acceptent un électron de la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur.

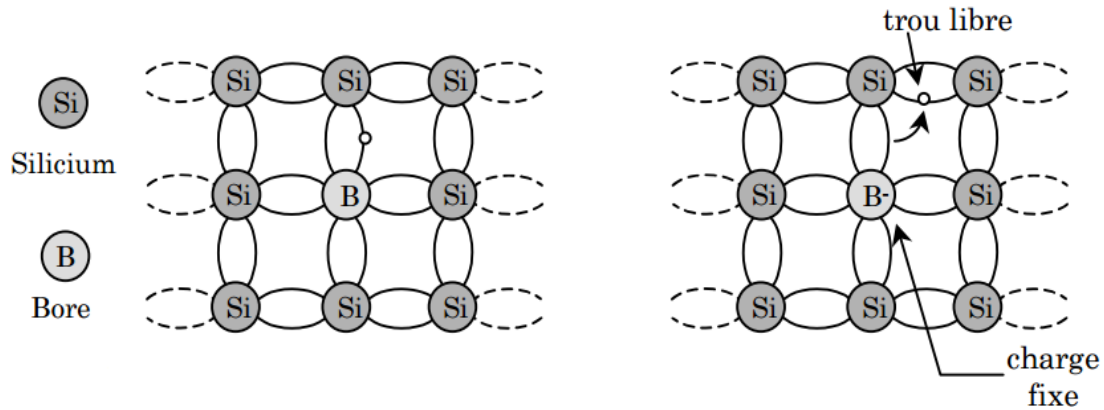


Figure 1.5 Silicium dopé au bore.

La figure (1.5) met en évidence qu'un semi-conducteur dopé P à une densité d'électrons n plus faible et une densité de trous p plus élevée que le même semi-conducteur pris dans sa configuration intrinsèque. On dit alors que les électrons sont les porteurs minoritaires et les trous, les porteurs majoritaires.

Pour les semi-conducteurs extrinsèques, la densité de dopant est toujours très supérieure à densité de porteurs intrinsèques $N_A \gg n_i$. Dans le cas d'un type p, la densité de trous est donc proche de celle du dopant accepteur N_A . La relation étant toujours vérifiée, nous obtenons pour les densités de porteurs:

$$n = \frac{n_i^2}{N_A} \quad (1.4)$$

$$P = N_A \quad (1.5)$$

Le niveau de Fermi pour un semi-conducteur type p ou potentiel chimique est alors :

$$E_{Fp} = E_v + kT \ln \frac{N_v}{N_A} \quad (1.6)$$

b Type n

Un semi-conducteur type n est un semi-conducteur intrinsèque (ex: silicium Si) dans lequel on a introduit des impuretés de type donneurs (ex: phosphore P). Ces impuretés sont ainsi

Chapitre 1: les détecteurs à base de semi-conducteur

appelées parce qu'elles donnent un électron à la bande de conduction pour réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur

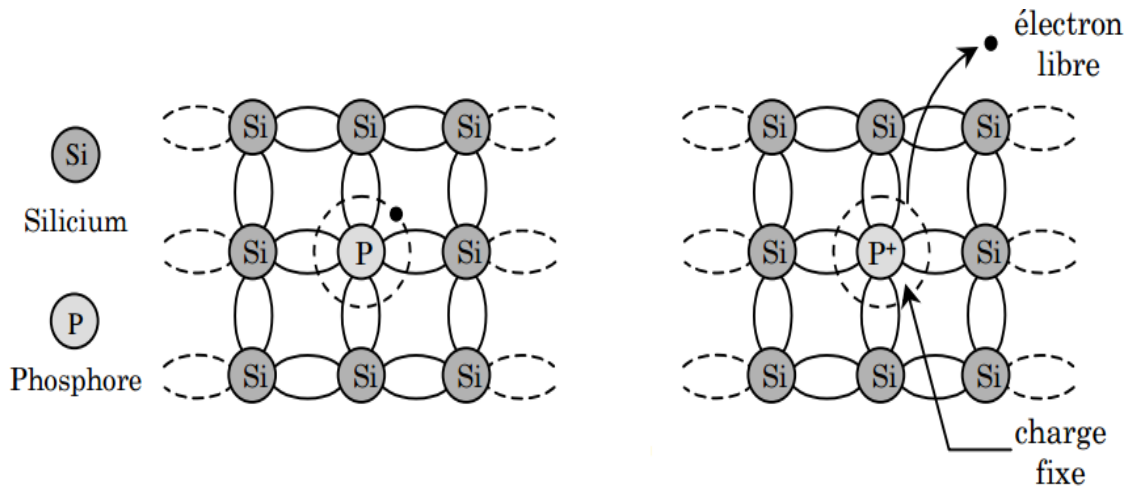


Figure 1.6 Silicium dopé au phosphore.

La figure (1.6) met en évidence qu'un semi-conducteur dopé N a une densité d'électrons n plus élevée et une densité de trous p plus faible que le même semi-conducteur pris dans sa configuration intrinsèque. On dit alors que les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous, les porteurs minoritaires.

$$n = N_D \quad (1.7)$$

$$p = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (1.8)$$

Le niveau de Fermi pour un semi-conducteur type n est alors :

$$E_{Fn} = E_c - kT \ln \frac{N_c}{N_D} \quad (1.9)$$

1.5. La jonction pn

1.5.1. Définition

La jonction PN consiste en la mise en contact entre un semi-conducteur type N et un semi-conducteur type P issue d'un même matériau qui peut être pour le cas qui nous intéresse du Silicium la densité des atomes donneurs est notée N_D et la densité d'atomes accepteurs est noté N_A . Pour une jonction PN abrupte la différence entre les densité des donneurs et des accepteurs ($N_D - N_A$) passe brutalement d'une valeur négative au niveau de la région P à une valeur positive au niveau de la région N figure (1.7).

La représentation des bandes énergétiques éclaire la situation La figure (1.1) représente le diagramme des bandes d'énergie du silicium. Le niveau EC représente le bas de la bande de conduction, le niveau EV le haut de la bande de valence et le niveau EF l'énergie de Fermi. Quand on met en contact le silicium de type P avec le silicium de type N les niveaux de Fermi s'alignent dans les deux parties pour être constant a travers tout le semi-conducteur et les niveaux EC et EV se courbent pour être continus à travers la jonction. La région ou les niveaux EC et EV ne sont pas horizontaux correspond à la région de charge d'espace La différence entre les deux zones de concentration en accepteurs N_A et en donneurs ionisés N_D , fait apparaître une barrière de potentiel V_B .

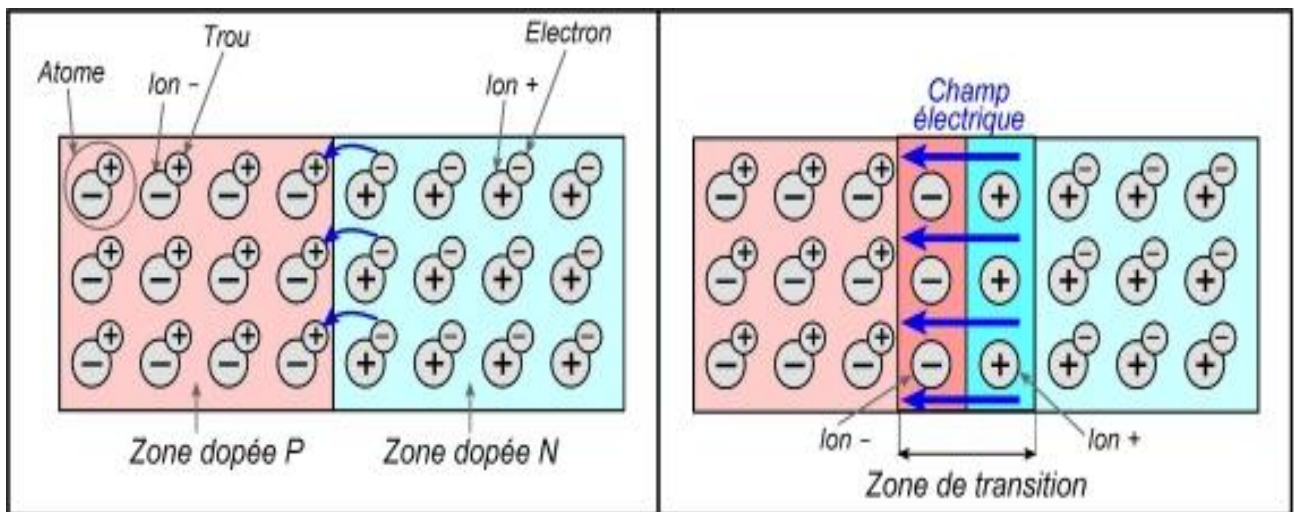


Figure 1.7 La jonction pn.

1.5.2. Jonction pn polarisé en direct

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

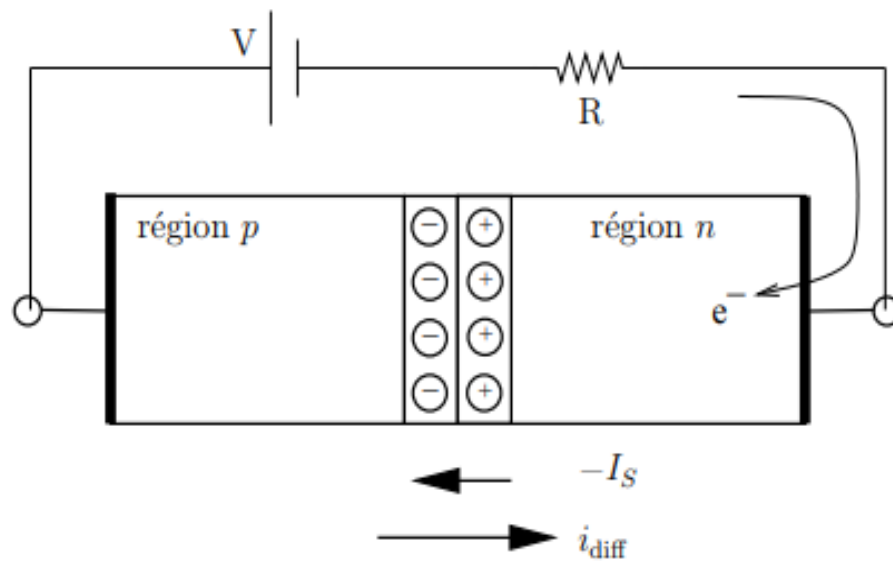


Figure 1.8 Représentation de la polarisation directe

1.5.3. Jonction pn polarisé en inverse

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

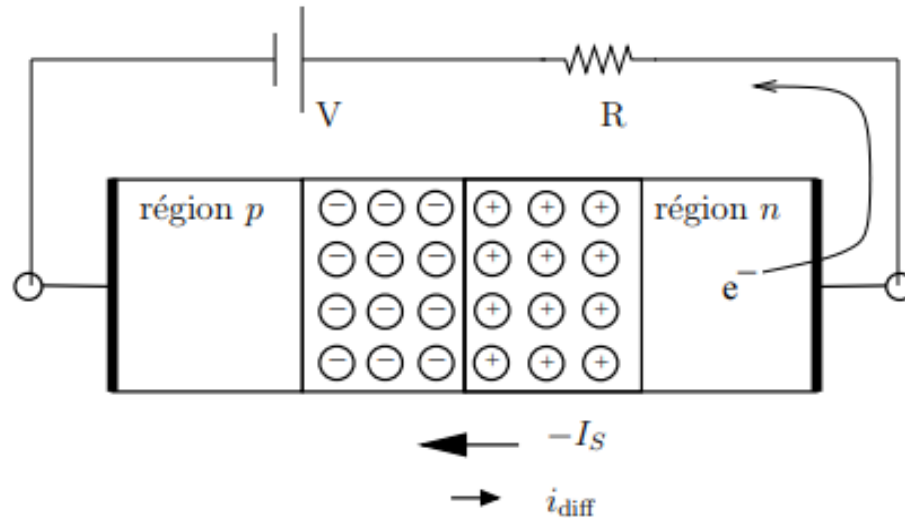


Figure 1.9 Représentation de la polarisation inverse

1.6. Détecteur à semi-conducteur

1.6.1. Introduction

Les détecteurs de radiation à base de semi-conducteurs ont une bonne résolution énergétique par rapport à plusieurs détecteurs [3]. Les porteurs de charge qui portent l'information élémentaire sont les paires électron-trou créées tout au long du trajet de la particule incidente. Parmi les avantages des détecteurs à semi-conducteurs il y a leur petite taille, leur vitesse élevée, et leur épaisseur qui peut être changée pour répondre à plusieurs nécessités expérimentales. Les matériaux semi-conducteurs utilisés doivent avoir des mobilités d'électrons et de trous relativement élevées pour assurer une collection rapide de charge. Les matériaux les plus étudiés et les plus utilisés dans les détecteurs sont le silicium (Si) et l'arséniure de gallium (GaAs).

1.6.2. Principe de fonctionnement des détecteurs à semi-conducteurs

Quand une particule incidente avec une énergie cinétique considérable, passe par un détecteur, son énergie est dissipée tout au long de son trajet en créant des paires électron-trou. Le long de ce trajet, plusieurs paires électron-trou sont générées par interaction coulombienne soit directement ou indirectement. Le nombre de paires électron-trou généré est proportionnel à la perte d'énergie, donc la détection de la quantité de charge donne une estimation de la perte

Chapitre 1: les détecteurs à base de semi-conducteur

d'énergie. En particulier, lorsqu'une particule traverse le silicium, elle crée environ 80 paires électron-trou par micron. En général, des substrats de silicium de 300 microns d'épaisseur sont utilisés car cette taille correspond au standard de l'industrie. Une particule au minimum d'ionisation génère alors environ 24000 paires électron-trou ce qui est aisément détectable avec l'électronique de lecture actuelle dont le bruit reste inférieur à 1000 équivalent électron. La structure simple qui constitue la jonction p-n pourrait être utilisée pour détecter des particules mais ses performances seraient médiocres. Les paires électrons-trous créées dans l'épaisseur de la zone désertée, soumises à un champ faible, subiraient des phénomènes de recombinaison entre elles et avec les impuretés du réseau. D'autre part, l'épaisseur désertée étant faible, seule une fraction de l'énergie déposée par la particule pourrait être détectée [3]. Dans le cas où une polarisation inverse est appliquée (potentiel positif à la partie dopée n et négatif à la partie dopée p), les électrons (trous) libres sont attirés vers la partie extérieure du cristal polarisée positivement (négativement). Si la tension appliquée est suffisante, nous pouvons ainsi dépeupler toute charge libre, l'épaisseur entière de la jonction p-n, voir figure (1.9). Il devient donc possible de détecter le passage d'une particule dans une telle structure. Le théorème de Ramo dit que la quantité de charge mesurée est déterminé par la distance dont les électrons et les trous traversent dans le champ électrique à travers le dispositif avant d'être piégés ou collectés. Cependant, l'efficacité de collection de la charge d'espace (CCE) dépend du libre parcours moyen des porteurs de charge. D'après la relation donnant le libre parcours moyen $\lambda = v \cdot \tau$ où $v = (\mu \cdot E)$ est la vitesse de déplacement, et τ est le temps de vie des porteurs de charge, les basses valeurs de CCE sont le résultat des faibles vitesses des porteurs de charge ou de leur faible temps de vie. Dans ce sens, le CCE est régi par la sensibilité du détecteur à toute la charge déposée dans son volume.

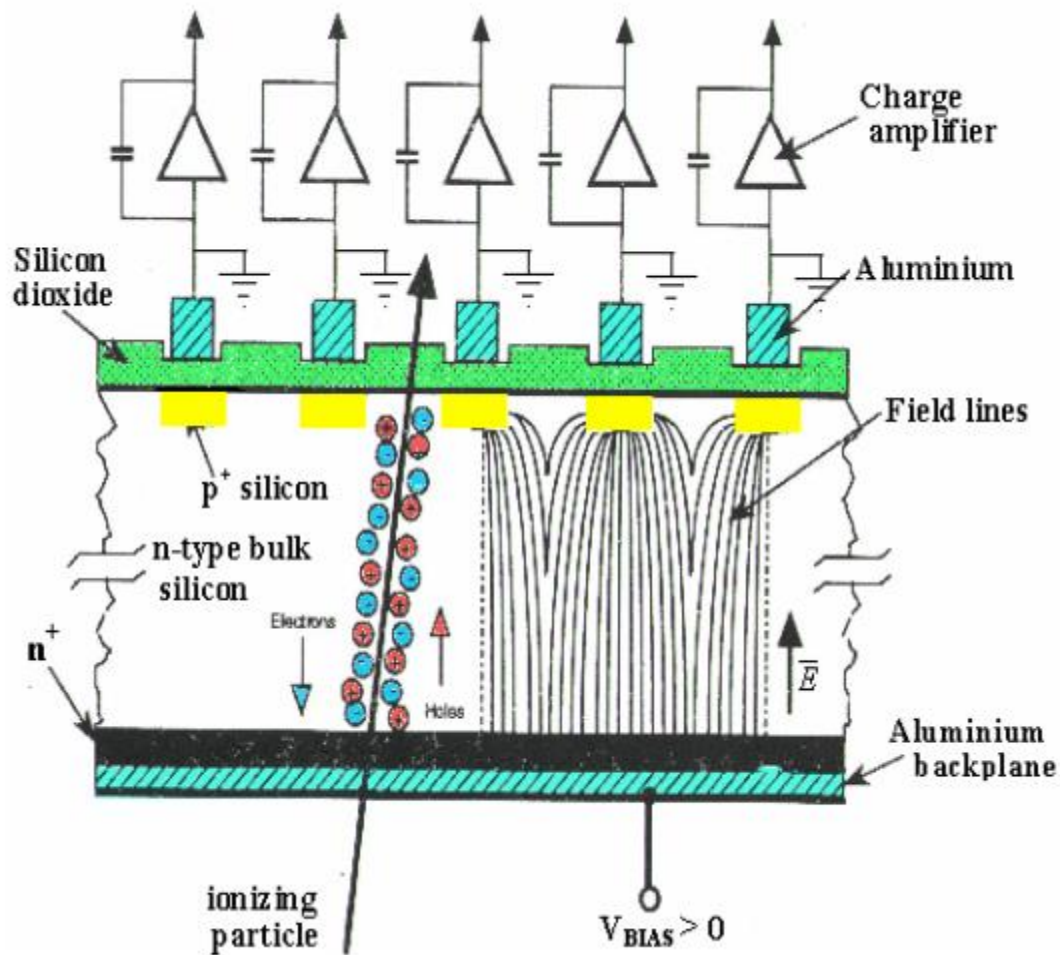


Figure 1.10 Principe de la détection dans un détecteur à semi-conducteur

1.7. L'effet des radiations sur un détecteur

1.7.1. Effet de surface

A la différence des défauts créés dans le substrat, 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. Alors que dans un semi-conducteur délité, les créations de paires électron-trou sont recherchées pour la formation d'un signal permettant la détection des particules. 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-

Chapitre 1: les détecteurs à base de semi-conducteur

conducteur rendant les effets transitoires. Au contraire, dans les couches de SiO_2 , dont la structure du réseau est amorphe, ils peuvent être bien moins mobiles et se retrouvent souvent piégés. Les effets sont alors semi-permanents. La figure (1.11) est un diagramme de bandes d'énergie d'une structure MOS (Métal-Oxyde-Semi-conducteur) représentant les différents effets de surface qui interviennent suite à une interaction ionisante dans la couche de SiO_2 . L'électron et le trou créés par l'interaction d'une particule dans la couche de SiO_2 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 alors une couche d'inversion dans le silicium (représentée par une concentration de porteur de charge négative sur la figure). Dans une structure de transistor MOS comme celle de la figure (1.11) ces effets conduisent à un déplacement des tensions de seuil et vont perturber le fonctionnement.

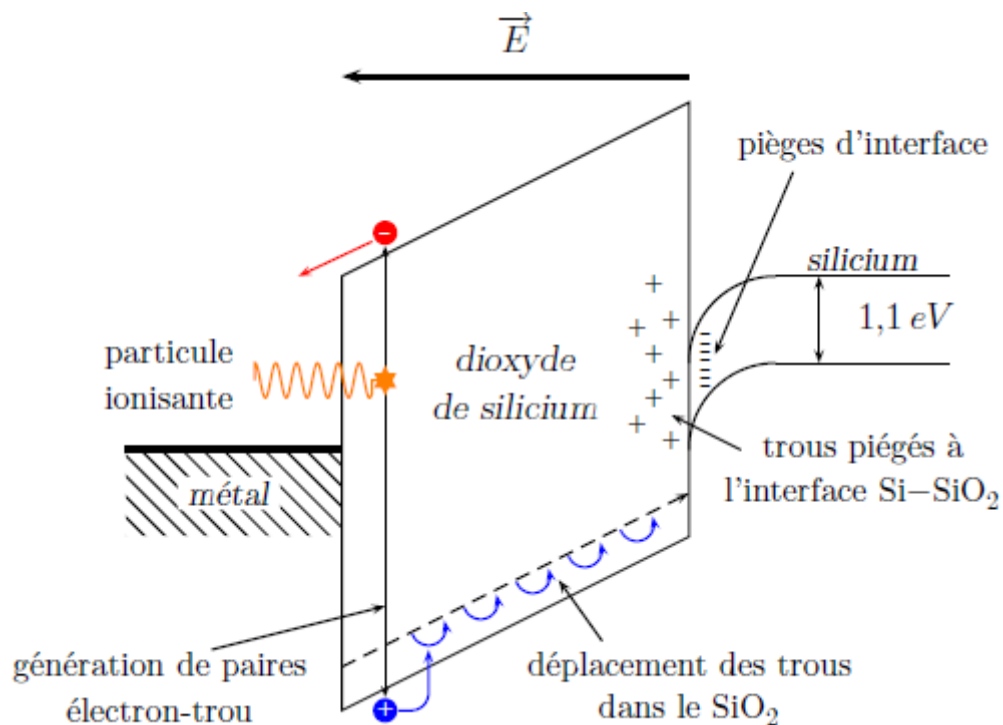


Figure 1.11 Représentation schématique des effets de surface dans un dioxyde de silicium subissant une interaction ionisante.

1.7.2. Effet de volume

Les pertes d'énergies non-ionisantes produisent des effets permanents comme le déplacement de noyaux dans le réseau cristallin, laissant une structure localement désordonnée. Une particule de haute énergie peut transmettre suffisamment d'énergie au noyau pour lui permettre de s'extraire de son site. Pour des particules de très haute énergie, ces collisions peuvent provoquer une transmutation du noyau et une pollution locale du substrat par les fragments libres du noyau. Ces fragments sont très fortement ionisés. Lorsqu'un seul noyau est déplacé par une collision, le défaut est ponctuel. Si au contraire le noyau déplacé entre en collision avec au moins un autre noyau et qu'au final plusieurs noyaux sont déplacés, on parle d'un cluster de défauts. Le seuil d'énergie nécessaire pour provoquer le déplacement d'un noyau dépend de la masse de la particule incidente.

1.8. Technique d'isolation des pixels

1.8.1. P-spray

L'isolation par p-spray consiste à une couche de type p qui est habituellement implanté au début du traitement de la structure lorsque la surface de la plaquette de silicium est claire et uniforme [4]. La concentration maximale de la distribution du dopant située à proximité de l'interface oxyde/silicium doit atteindre une valeur permettant d'éviter la formation d'une couche d'inversion (d'électrons) sous l'oxyde. Cette méthode est particulièrement attrayante pour sa simplicité et pour le fait qu'aucun masque photo-lithographique n'est nécessaire pour sa formation (ce qui signifie moins de probabilité de défauts et moins de coûts). Son principal inconvénient est que les régions n fortement dopées (bandes) sont directement en contact avec la couche de pulvérisation p à dose moyenne, faisant de la tension de claquage un problème critique. Pour cette raison, l'énergie et la dose de l'implantation doivent être soigneusement calibrées afin d'obtenir le pic de concentration le plus faible capable d'empêcher la formation de la couche d'inversion. Dans le cas des détecteurs de radiations à utiliser dans des environnements à radiations sévères, ceci est plutôt problématique car les paramètres de l'implant doivent être étalonnés pour contrebalancer les densités de charges d'oxyde positives très élevées qui peuvent être créées par les rayonnements ionisants.

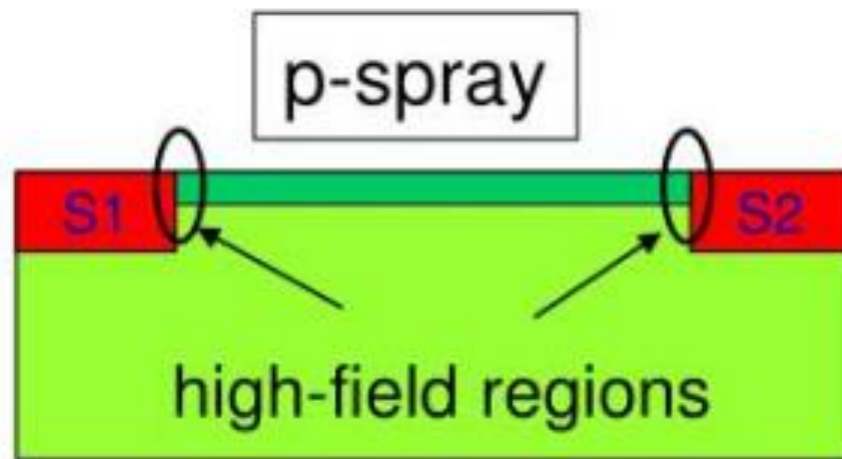


Figure 1.12 Schéma de la structure p-spray.

1.8.2. P-stop

La deuxième solution possible pour l'isolation des pixels dans des substrats de type p est le p-stop [5]. Il consiste à des implants à haute dose mise en place entre les pixels. En ce qui concerne la solution de p-spray, la principale différence est que l'implant p ne touche pas la couche n, sa dose peut donc être réglée suffisamment élevée pour équilibrer toute densité de charge d'oxyde raisonnable sans réduire excessivement la tension de claquage. La région la plus critique de ce point de vue est maintenant le p-stop, où l'implant p fait face aux électrons de la couche d'inversion qui sont au même potentiel que les pixels. Les champs devraient être inférieurs à ceux présents dans la solution de p-spray, mais la situation semble plus critique du point de vue de la reproductibilité car la dégradation se produit dans une région frontalière où une situation bien définie (p-implant) fait face à un élément non nécessairement uniforme (électrons à l'interface Si / SiO).

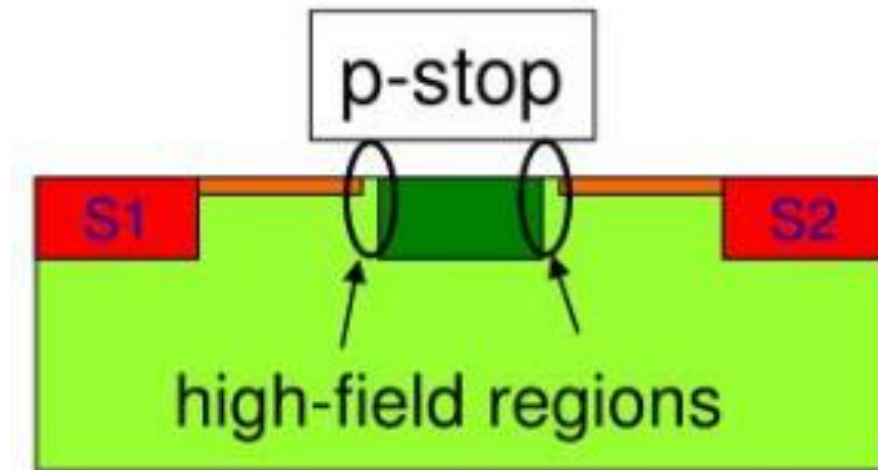


Figure 1.13 Schéma de la structure p-stop.

1.8.3. Moderate

La dernière solution consiste en une combinaison des deux techniques précédemment décrites, à la fois p-stop et p-spray sont mises en œuvre sur la même structure. Cette dernière peut être fabriquée soit avec une seule étape d'implantation d'ions après avoir correctement structuré le diélectrique au sommet de la plaquette, soit avec deux implantations séparées. Cette analyse est beaucoup plus simple car elle repose sur les deux précédentes [5].

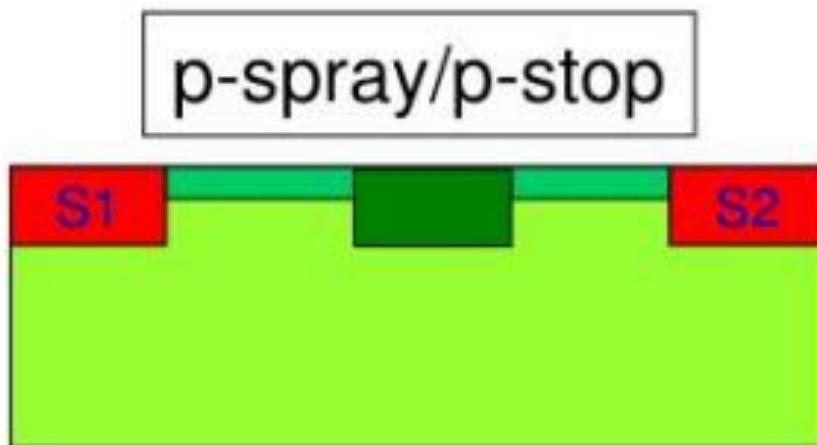


Figure 1.14 Schéma de la structure p-moderate.

1.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait un rappel succinct sur des notions de base sur les semi-conducteurs étant donné que le silicium est le matériau de base de notre structure à étudier. La jonction PN est en général l'élément essentiel utilisé pour la détection des particules, et plus particulièrement dans la détection des traces, dans le cadre de la physique des hautes énergies. De ce fait, nous l'avons décrite à travers son mode de fonctionnement.

Nous avons clôturé ce chapitre par la description des différents types d'isolation entre les pixels afin de remédier à la couche d'inversion créées sous l'oxyde après de fortes radiations.

Chapitre 2

*Outils de
simulation
TCAD_SILVACO*

2.1. Introduction

Dans notre travail nous avons utilisé un logiciel de simulation technologique (TCAD), pour étudier l'effet de la couche d'isolation sur un détecteur de particules, mais il faut tout d'abord connaître quelques notions principales sur la simulation en générale et ce logiciel en particulier. Dans notre travail nous avons utilisé un logiciel de simulation technologique (TCAD), pour simuler les caractéristiques électriques d'un détecteur de particule, 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.



Figure 2.1 Le rôle de la simulation.

2.3. TCAD Silvaco

SILVACO [5] est une société Américaine, «Silvaco International» ayant son siège à Santa Clara en Californie. Elle est un des principaux fournisseurs de chaines professionnelles de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur pour les technologies de l'électronique TCAD (Technologie 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 [6].

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. 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, de nouvelles techniques de maillage, l'optimisation de solutions linéaires, etc, tout en permettant d'obtenir des résultats de simulation très proches de ceux obtenus pratiquement après conception en salle blanche. L'entrée de SILVACO dans la technologie TCAD 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). 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 [7]

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.

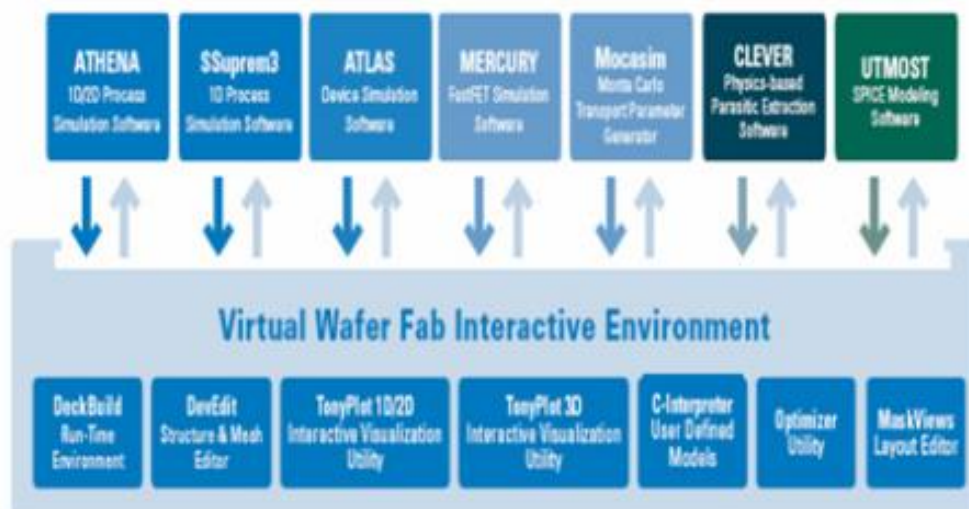


Figure 2.2 Environnement virtuel de fabrication des plaquettes de silicium.

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. Il est capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime (DC), (AC), transitoire ou fréquentiel. En plus du comportement électrique "externe", il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les concentrations des porteurs, les lignes de courant, le champ électrique ou le potentiel, et des données importantes pour la conception et l'optimisation des procédés technologiques. Ceci est réalisé en résolvant numériquement l'équation de Poisson et les équations de continuité des électrons et des trous en deux dimensions en un nombre fini de points formant le maillage de la structure définie par l'utilisateur ou par le programme. 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 «Deckbuild ». 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 ».

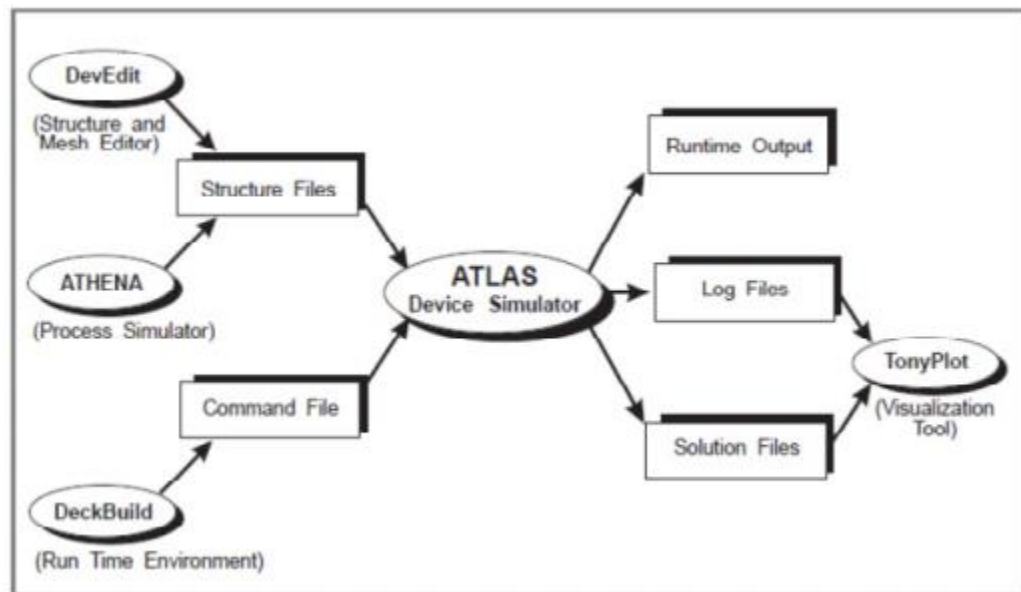


Figure 2.3 Les entrées et sorties du ATLAS.

2.5.1. Mode d'opération d'ATLAS

On introduit la commande dans DECKBUILD par « go atlas ».

La syntaxe d'une instruction sous ATLAS prend la forme générale suivante :

<Instruction> <paramètre> = < valeur>

Il y a 04 types pour les valeurs (réel, entier, logique, caractère). L'ordre des paramètres n'est pas obligatoire, l'abréviation est possible mais exige le non chevauchement avec d'autres instructions. Pour écrire un commentaire on utilise le symbole # qui n'est pas exécuté par le compilateur. ATLAS peut lire 256 caractères dans une ligne, mais il vaut mieux séparer les lignes par un antislash \ à la fin de la ligne dans une longue instruction, pour qu'on puisse lire les instructions d'une manière claire. Il n'y pas de différence entre une lettre majuscule et une lettre minuscule [5].

2.5.2. Simulation du dispositif

Pour effectuer une simulation sous environnement SILVACO, il nécessaire de bien définir la structure utilisée. On doit spécifier le domaine physique de la simulation, les différents matériaux que constituent cette structure, les électrodes et le dopage des différentes régions afin de dessiner le maillage adéquat à l'étude de notre structure. Les contacts métalliques en haut et en bas sont définis par leur travail de sortie et la vitesse de recombinaison en surface [9].

2.5.3. Deckbuild

Le DECKBUILD est l'environnement où est défini le programme de simulation à travers des commandes spécifiques. De multiples simulateurs considérés comme des entrées peuvent être utilisés avec le DECKBUILD la figure (2.4): ATHENA, ATLAS, SSUPREM3,... . Sous cet environnement nous pouvons visualiser sur une fenêtre d'information (Output window) les résultats de simulation tels que les paramètres technologiques (profondeur de jonction, concentration des porteurs) et les paramètres électriques (tension de seuil, courant, etc.) [9]

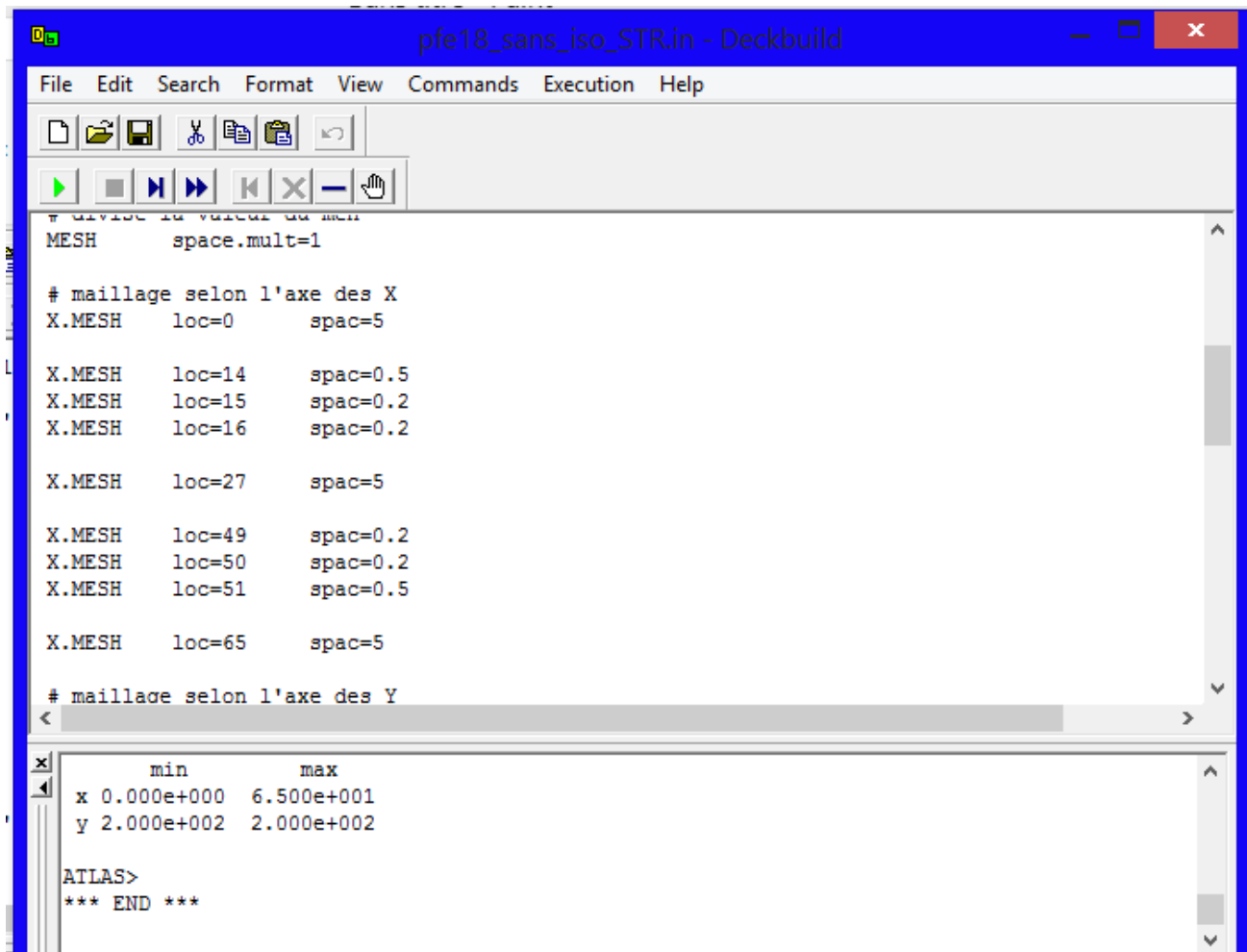


Figure 2.4 Le logiciel Silvaco en cours d'exécution.

2.6. Ordre des commandes

L'ordre est très important dans ATLAS, il y a 05 groupes d'instructions qui doivent apparaître dans un ordre correct comme le montre la figure (2.5).

<i>Group</i>		<i>Statements</i>
1. Structure Specification	————	MESH REGION ELECTRODE DOPING
2. Material Models Specification	————	MATERIAL MODELS CONTACT INTERFACE
3. Numerical Method Selection	————	METHOD
4. Solution Specification	————	LOG SOLVE LOAD SAVE
5. Results Analysis	————	EXTRACT TONYPLOT

Figure 2.5 Les groupes et sous-groupes dans ATLAS.

2.6.1. Spécification de la structure

a Maillage

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. Principe de base est la discrétisation par éléments des équations à traiter. Le type de 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 Figure 2.6 indique le maillage d'une structure planaire que nous allons étudier par la suite.

Le maillage comportent plusieurs triangles et plusieurs noeuds. Pour chaque point, le simulateur résout les principales équations fondamentales des semi-conducteurs (équations différentielles). Donc il faut toujours chercher un maillage optimal afin de faire un compromis entre le temps de calcul et la précision des résultats.

La syntaxe qui définit le maillage est sous la forme :

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

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

X.MESH : Lignes horizontales suivant l'axe des X.

Y.MESH : Lignes horizontal et vertical suivant les axes (X, Y).

LOCATION : Positionnement suivant les axes (X, Y).

SPACING : Valeur de l'espacement entre les locations (les positionnements).

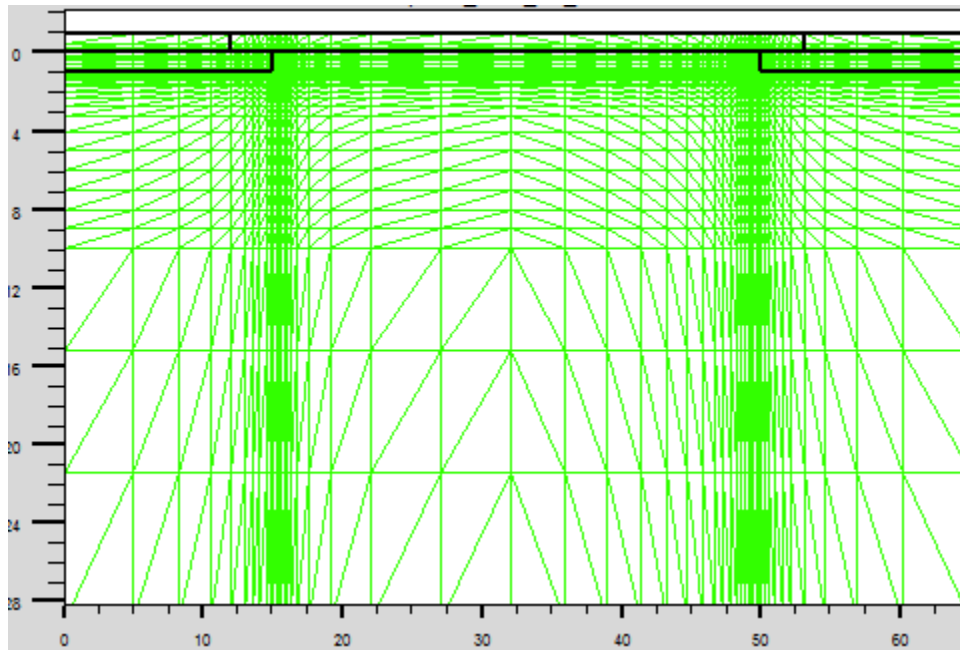


Figure 2.6 Définition du maillage avec Atlas.

Par exemple:

X.MESH loc=0 spac=5

X.MESH loc=19 spac=0.8

Y.MESH loc=0.00 spac=0.2

Y.MESH loc=4 spac=0.8

Remarque

L'espacement doit être plus fin au niveau des jonctions métallurgiques et des interfaces. A ces endroits les phénomènes physiques changent brusquement.

b Régions

On peut avoir jusqu'à 200 régions différentes dans ATLAS. Dans notre cas On distingue bien cinq régions, les bordures de chaque région est défini par les deux axes (X, Y) comme la Figure (2.7) nous montre.

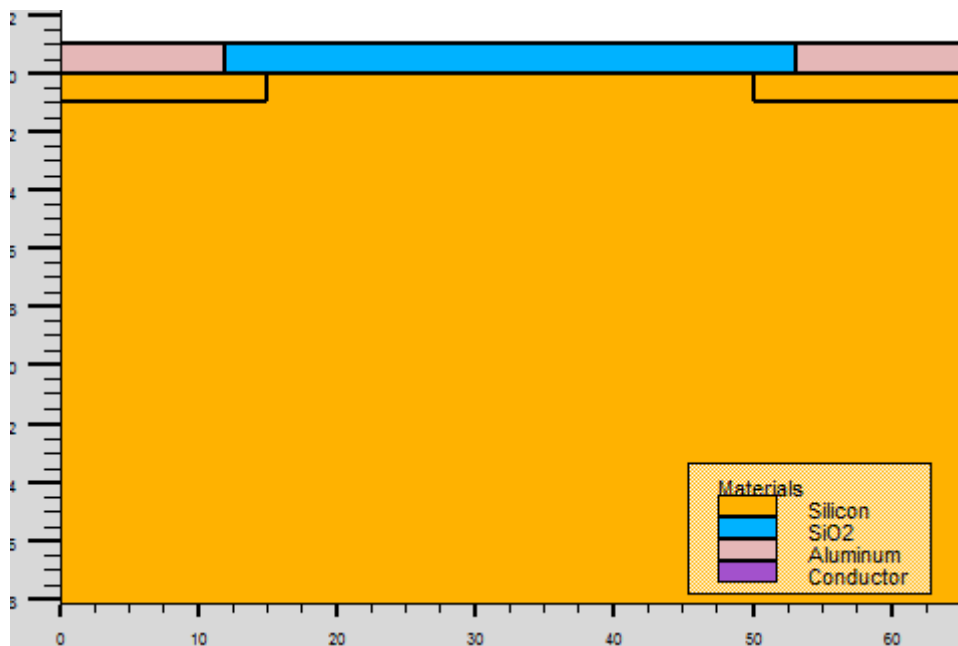


Figure 2.7 Définition des régions avec Atlas.

La syntaxe qui définit les régions est sous la forme :

REGION NUMBER=<n><material> [<position>]

Exemple:

----- silicon

REGION num=1 silicon

----- pixel

REGION num=2 silicon x.min=45 x.max=55 y.min=0 y.max=45

----- backside

REGION num=3 silicon x.min=0 x.max=100 y.min=48 y.max=50

c Electrodes

On peut avoir deux types des électrodes (anode et la cathode), le rôle de chaque une est le contact de substrat avec le circuit La Figure (2.8). Le Logiciel Silvaco peut spécifier jusqu'à 50 électrodes.

Les positions des électrodes sont localisées par les instructions suivantes [8] :

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

RIGHT: La position de l'électrode se situe à la droite de la structure.

La syntaxe qui définit les électrodes est sous la forme :

ELECTRODE NAME=<en>[NUMBER=<n>] [sub_depthSTRATE] <pos><reg>

Electrode name=substrate x.min=0 length=65

Electrode substrate

Electrode name =substrate

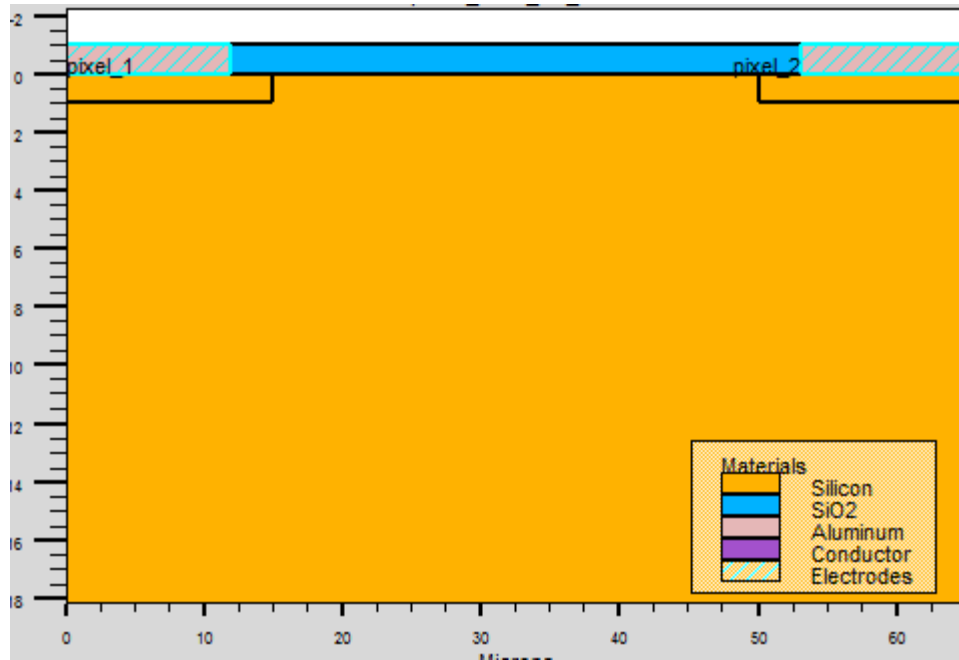


Figure 2.8 Définition des électrodes (anode et la cathode) avec Atlas.

d Dopage

La syntaxe qui définit le dopage est sous la forme :

DOPING <distribution_type><dopant_type><position_parameters>

Nous avons dopé cinq régions avec différentes concentration de dopage comme indiqué ci-dessous.

----- P- doping

DOPING uniform p.typeconc=1.e+12

----- N+ pixel doping

DOPING uniform n.typeconc=1.e+18 region=2

----- N+ doping

DOPING uniform p.typeconc=1.e+18 region=3

----- P+ doping

DOPING uniform p.typeconc=1.e+19 region=4

Une fois la structure est définie, on peut enregistrer ces informations dans un fichier de type **.str**. Ceci peut être accompli par l'instruction suivante. **SAVE outfile=fichier.str**

On peut aussi visualiser le schéma de la structure par l'outil '**TONYPLOT**' en utilisant l'instruction suivante.

TONYPLOT fichier.str

La figure (2.9) représente le profil du dopage dans la structure

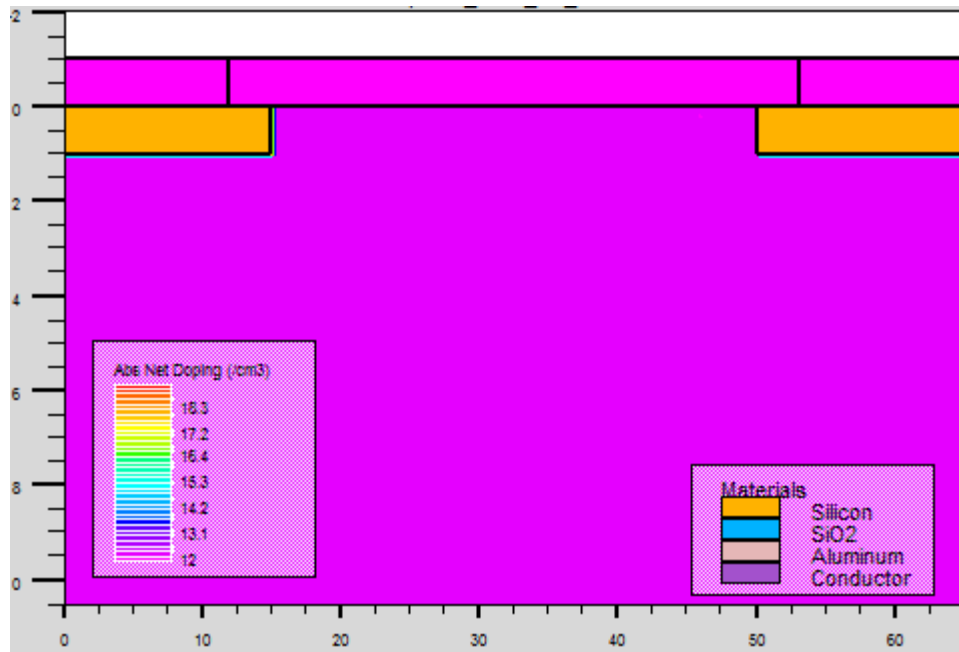


Figure 2.9 Profil du dopage.

2.6.2. Modèles des matériaux

a Matériaux

On peut spécifier les matériaux selon leurs propres propriétés physiques :

- La conductivité (conducteurs, semi-conducteurs, isolants)
- L'affinité électronique
- L'énergie du gap
- La mobilité
- La densité des porteurs
- La vitesse de saturation, etc...

b Modèle

Tous les modèles physiques sont spécifiés par les deux instructions MODELS et IMPACT. La syntaxe de la commande Model est la suivante.

MODELS <model flag><generalparameter><model dependentparameters>

Dans notre cas on a:

MODELS fldmob conmob srh auger bgn print temperature=300

fldmob: La dépendance de la mobilité du champ électrique.

conmob: La dépendance de la mobilité en fonction de la concentration des porteurs.

srh: Le facteur de génération recombinaison.

auger: Un effet peuvent être introduits dans le cas d'un fort dopage.

bgn: La bande interdite devient étroite dans le cas d'un fort dopage.

c Contact

Si une électrode est en contact avec un semi-conducteur, par défaut, ATLAS le reconnaît comme un contact ohmique.

Le contact détermine les attributs de l'électrode. La syntaxe de contact est comme suit.

CONTACT NUMBER=<n> | NAME=<ename> | ALL

Dans notre exemple on a deux contacts (anode, cathode).

CONTACT name=anode

CONATCT name=cathode

d Interface

La déclaration d'interface est utilisée pour définir la densité de charge présente à l'interface entre deux régions différentes. Ceci peut être accompli par l'instruction suivante.

INTERFACE QF=5.0x10⁺¹⁰

2.6.3. La méthode de résolution numérique

a Méthode numérique

Après la spécification du modèle des matériaux, le choix de la méthode numérique doit être spécifié. La seule commande qui s'applique pour la sélection de la méthode numérique est **METHOD**.

Il existe plusieurs méthodes numériques pour calculer des solutions aux problèmes des dispositifs à semi-conducteur. Trois types de techniques de solution sont utilisés dans le simulateur Silvaco Atlas:

- Entièrement couplé (**NEWTON**)
- Découplée (**Gummel**)
- Couplé et Découplée au même temps (**BLOC**)

Dans cet exemple, les équations sont résolues par la méthode **NEWTON**.

La méthode de Newton résout toutes les inconnues simultanément. La méthode Gummel résout pour chaque inconnues en gardant tous les autres inconnus constants. Le processus est répété jusqu'à ce qu'il y ait une solution stable. La méthode BLOC résout quelques équations avec la méthode NEWTON et les autres avec La méthode Gummel.

2.6.4. Les 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.

a Log

LOG enregistre toutes les caractéristiques du terminal dans un fichier. Toute donnée de type DC, transitoire, ou AC générée par la commande SOLVE après une commande LOG est enregistré. L'instruction suivante montre un exemple de la commande LOG:

```
LOG    outfile=nom_de_fichier.log
```

b Solve

SOLVE c'est La commande qui 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 init

SOLVE vsubstrate=-0.2 vstep=-0.2 vfinal=-1 name=substrate

Comme l'instruction nous montre tous les chiffres sont négatifs à cause de la polarisation en inverse. Dans cet exemple on commence par le point -0.2 jusqu'a -1 par un pas de -0.2

c Load et save

L'instruction de la commande LOAD est:

LOAD infile = nom_de_fichier_1V.str

La commande LOAD à un rôle bien précis, concernant le chargement d'informations de l'état président pour l'utiliser dans l'état suivant. L'instruction SAVE se trouve à la fin des informations d'un point de nœud dans un fichier de sortie **str** pour sauvegarder l'instruction SOLVE.

SAVE outfile = nom_de_fichier_1V.str

2.6.5. Analyse des résultats**a EXTRACT**

Les commandes de ce type sont utilisées pour extraire les valeurs bien précises des paramètres des deux types des fichiers log ou solution.

b TONYPLOT

TONYPLOT est L'environnement où sont tracés les résultats des simulations. Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil de dopage, et caractéristiques électriques). Selon le programme de simulation utilisé, TONYPLOT peut donner des caractéristiques de sortie en une, deux ou trois dimensions [9].

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 (figure 2.10). En suite les paramètres du dispositif peuvent être extraits avec la commande EXTRACT.

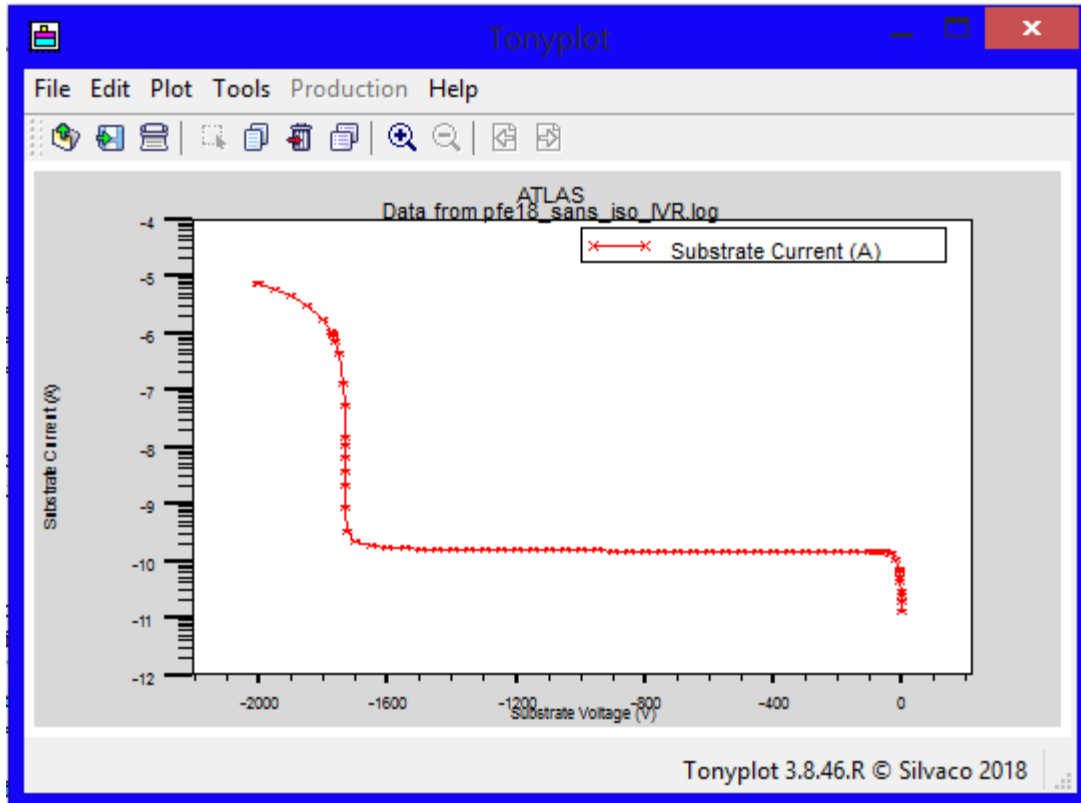


Figure 2.10 L'environnement TONYPLOT.

2.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes commandes utilisées dans le logiciel de simulation technologique ATLAS de la société SILVACO que nous avons utilisées dans notre programme pour étudier l'effet du type de la couche d'isolation sur un détecteur de particules de type planaire.

Chapitre 3

*Résultats et
simulation*

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exposer les principaux résultats obtenus par simulation de la structure planaire à l'aide des outils TCAD du logiciel SILVACO, en particulier l'outil de simulation électrique ATLAS.

Nous commençons par montrer la structure sans isolation, les différentes techniques d'isolations entre les pixels sont proposées dans la littérature, p-stop, p-spray et p-moderate, la différence entre la structure. Cette différence réside principalement, dans cette étude, dans la tension de claquage, le courant de fuite, le champ électrique, ainsi que l'évolution de la zone de charge d'espace. Par la suite nous montrons les différents cas qui peuvent représenter la structure planaire pour enfin ne sélectionner que la plus performante. Nous allons étudier par la suite l'effet des charges sur notre structure.

3.2. Structure sans isolation

La figure (3.1) représente la structure du détecteur planaire sans isolation.

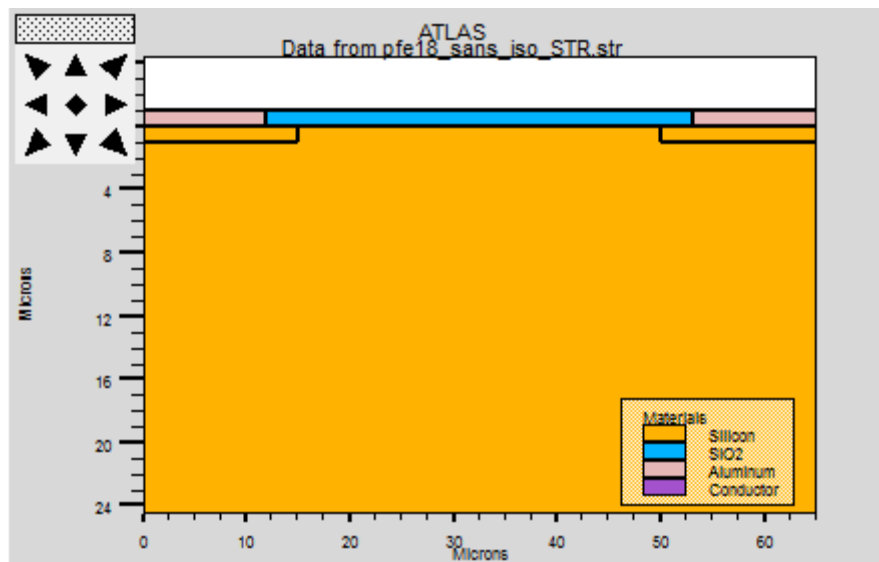


Figure 3.1 Représentation schématique de la structure sans-isolation.

3.2.1. Maillage

La figure (3.2) représente de maillage optimisé de la structure sans-isolation. Le maillage est plus raffiné au niveau des jonctions.

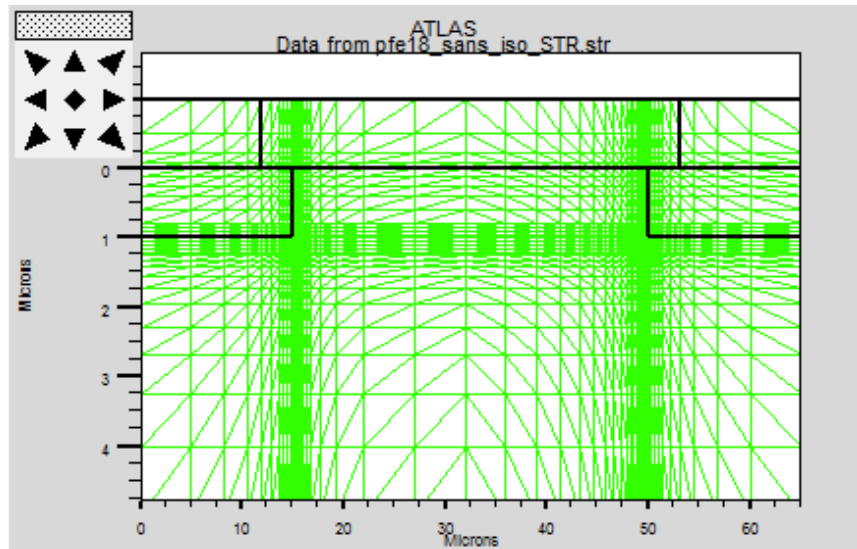


Figure 3.2 Schéma de maillage de structure.

3.2.2. Dopage sous ATLAS

La figure (3.3) représente le profil du dopage effectif dans la structure qui est la différence entre la concentration des accepteurs (N_A) moins la concentration des donneurs (N_D).

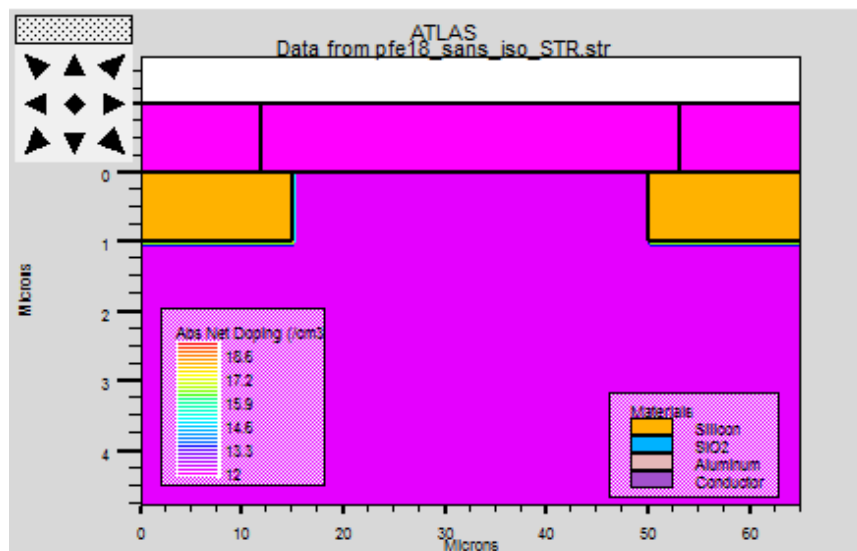


Figure 3.3 Représentation schématique de dopage sous ATLAS

3.2.3. Effet de l'oxyde de charge

a) Zone de charge d'espace

Pour pouvoir montrer l'évolution de la zone de charge d'espace sans charge et avec charges dans l'oxyde nous devons visualiser l'évolution de la concentration des porteurs libres de charges qui sont des trous dans notre cas. Pour cela, nous faisons une ligne de découpe au milieu de la structure. La figure (3.4) (sans charges) et la figure (3.5) (avec charges) montrent l'évolution de la zone de charge d'espace en fonction de la tension de polarisation pour deux valeurs de la tension de polarisation 10V et 100V.

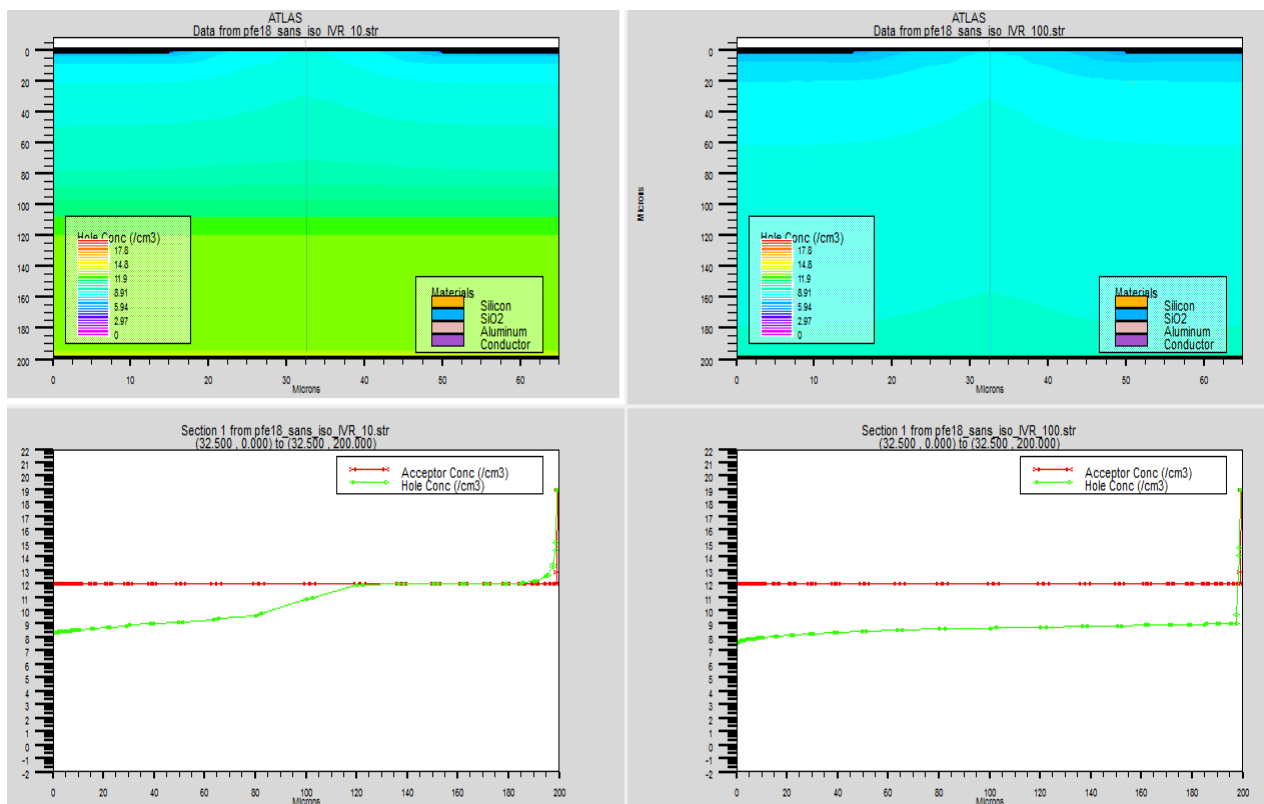


Figure 3.4 Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure sans charges dans l'oxyde.

La zone de charge d'espace augmente avec la tension de polarisation. Elle se développe de la jonction vers le fond de la structure. La zone de charge d'espace est déterminée par l'intersection de la concentration des trous avec la concentration des atomes accepteurs.

A 10V, la zone de charge d'espace est à 120 μm pour les deux cas (sans et avec charge) alors qu'à 100 V elle est atteinte le fond de la structure.

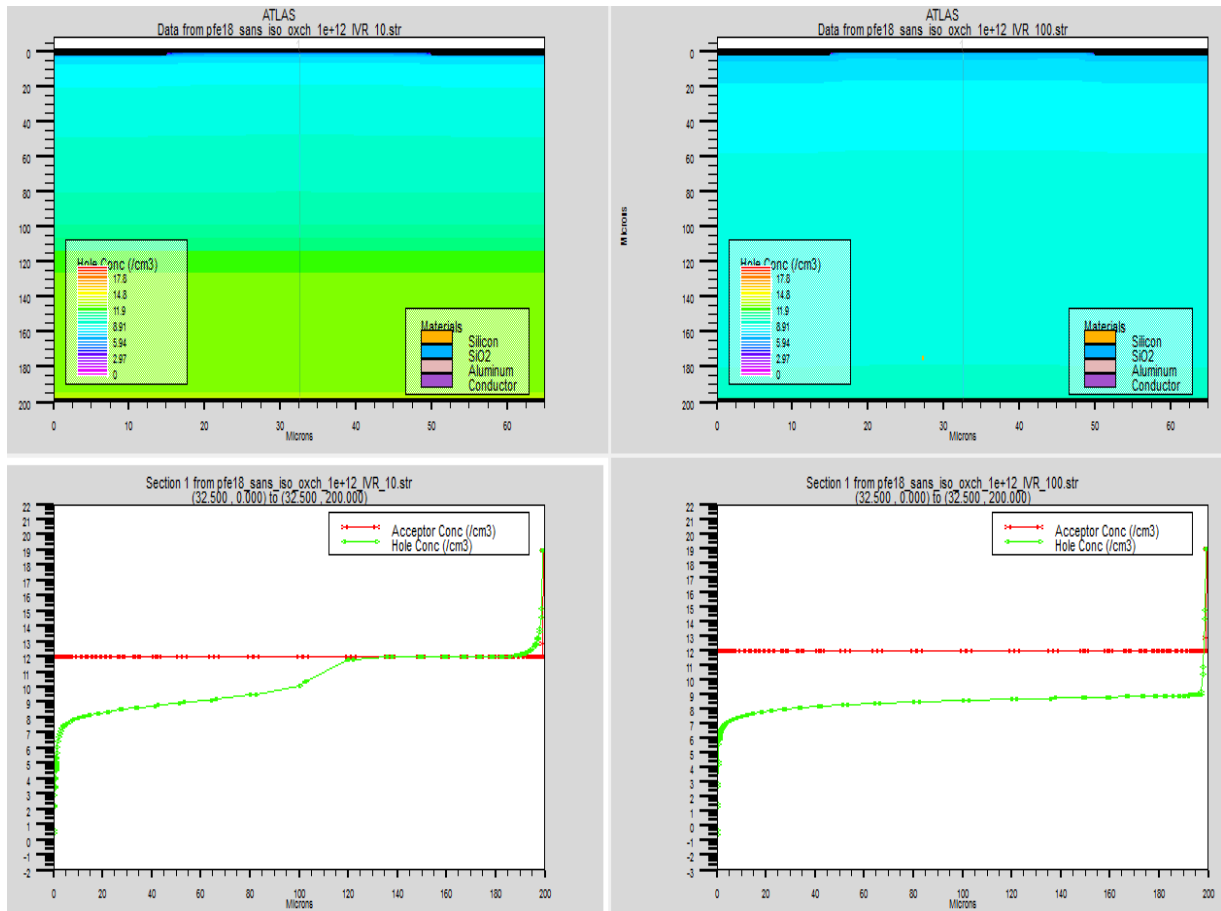


Figure 3.5 Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure avec une charge dans l'oxyde de 10^{+12} cm^{-2} .

b) Caractéristiques I-V

La figure (3.6) montre les caractéristiques courant-tension relatives à la structure présente sur la figure (3.1). Nous constatons que la tension de claquage augmente avec la charge présente dans l'oxyde. Cette augmentation est visible jusqu'à la valeur de 10^{+11} cm^{-2} , par la suite il n'y a aucune variation de la caractéristique I-V en fonction de la charge (figure 3.7). Le courant de fuite est constant sur une large gamme de polarisation et vaut $4 \times 10^{-10} \text{ A}/\mu\text{m}$.

c) Tension de claquage et courant de fuite

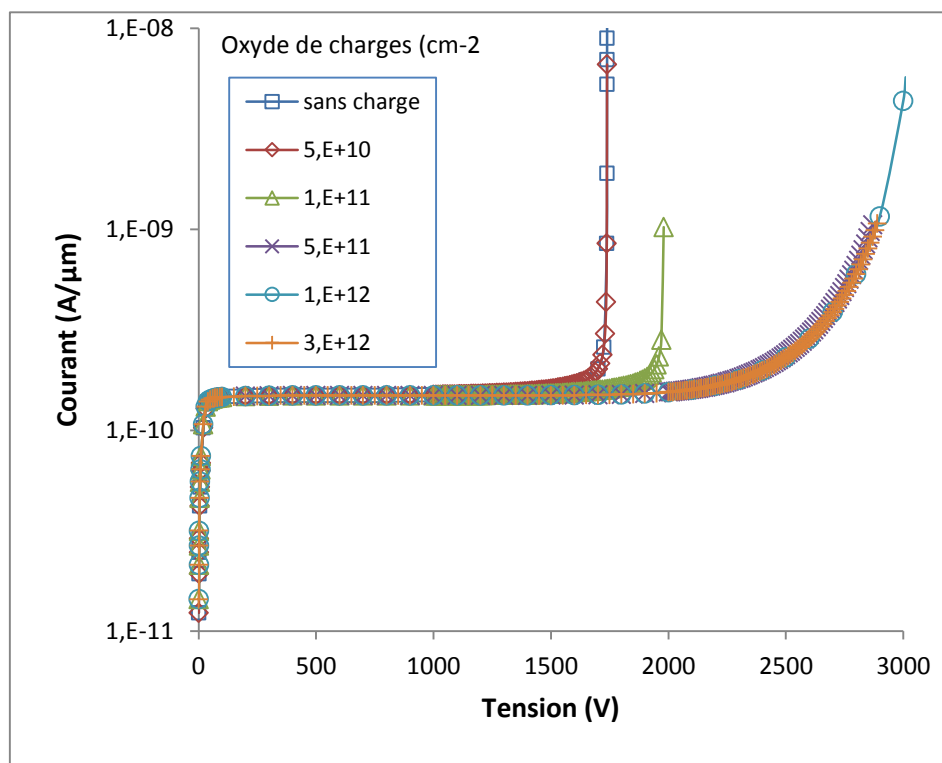


Figure 3.6 Caractéristique I-V de la structure sans-isolation.

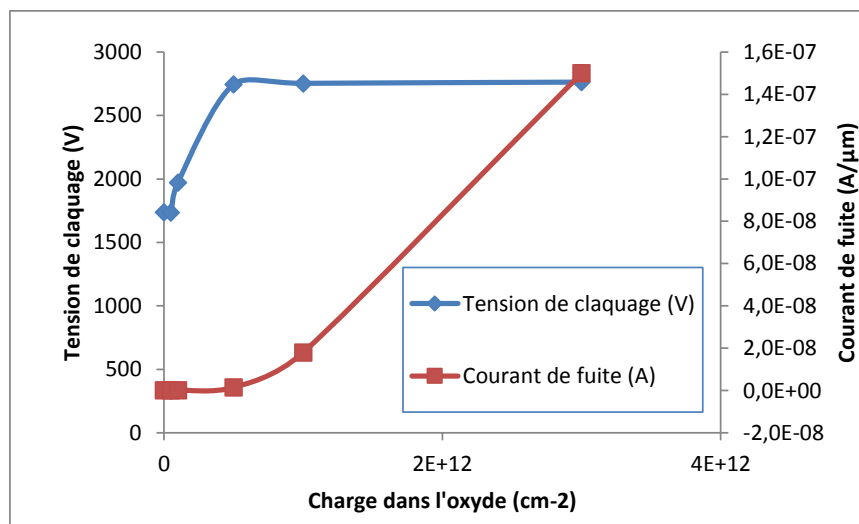


Figure 3.7 Variation de la tension de claquage et du courant de fuite en fonction de la charge dans l'oxyde.

d) Champ électriques

La figure (3.8) présente le champ électrique pour la structure sans-isolation et sans charges dans l'oxyde et la figure (3.9) présente le champ électrique avec charges dans l'oxyde pour deux tensions de polarisation de 10V (à gauche) et 100V (à droite). Dans les deux figures nous présentons aussi le profil du champ électrique de la structure de la figure (3.1) après une ligne de découpe verticale au milieu du pixel de gauche de la structure à 8 μm de la surface.

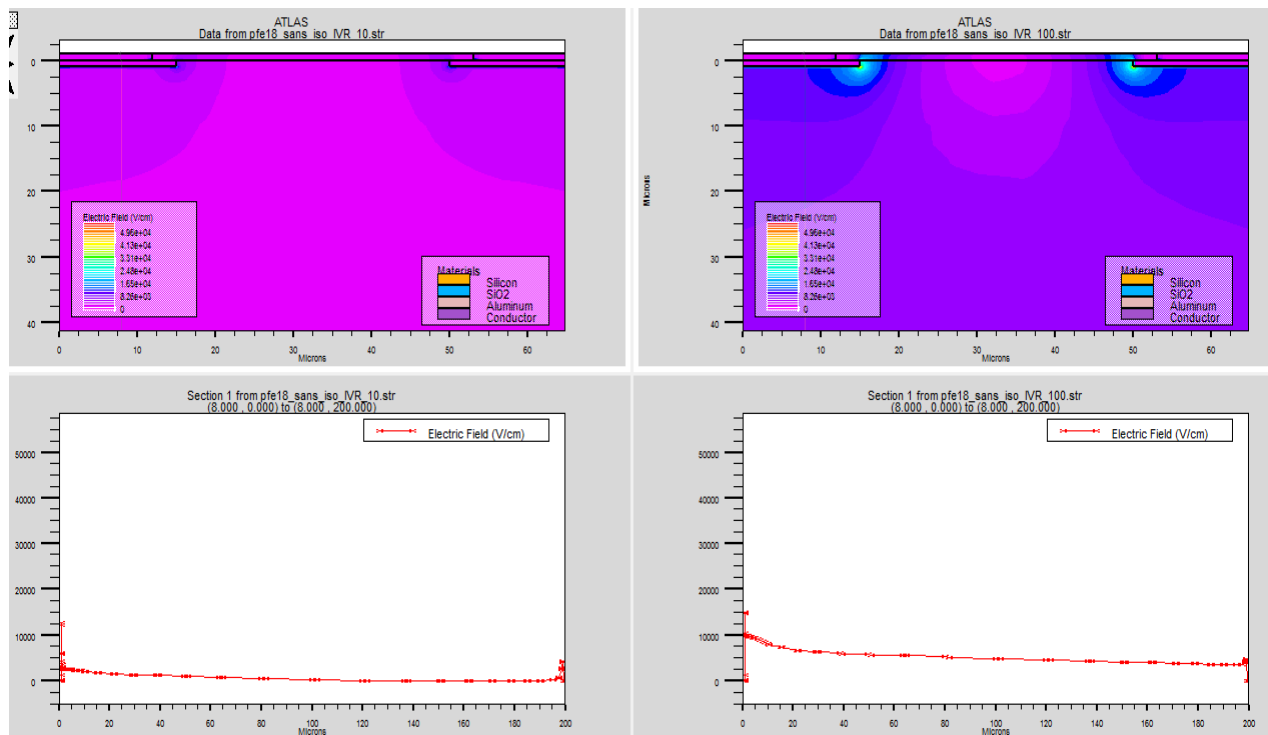


Figure 3.8 Représentation du champ électrique dans la structure (en haut) et son profil (en bas) avec une ligne de découpe au milieu du pixel sans charges dans l'oxyde.

On remarque que le champ électrique augmente avec la tension de polarisation au niveau de la jonction. A 10 V, il est de 12500 V/cm et à 100 V il est de 15000 V/cm.

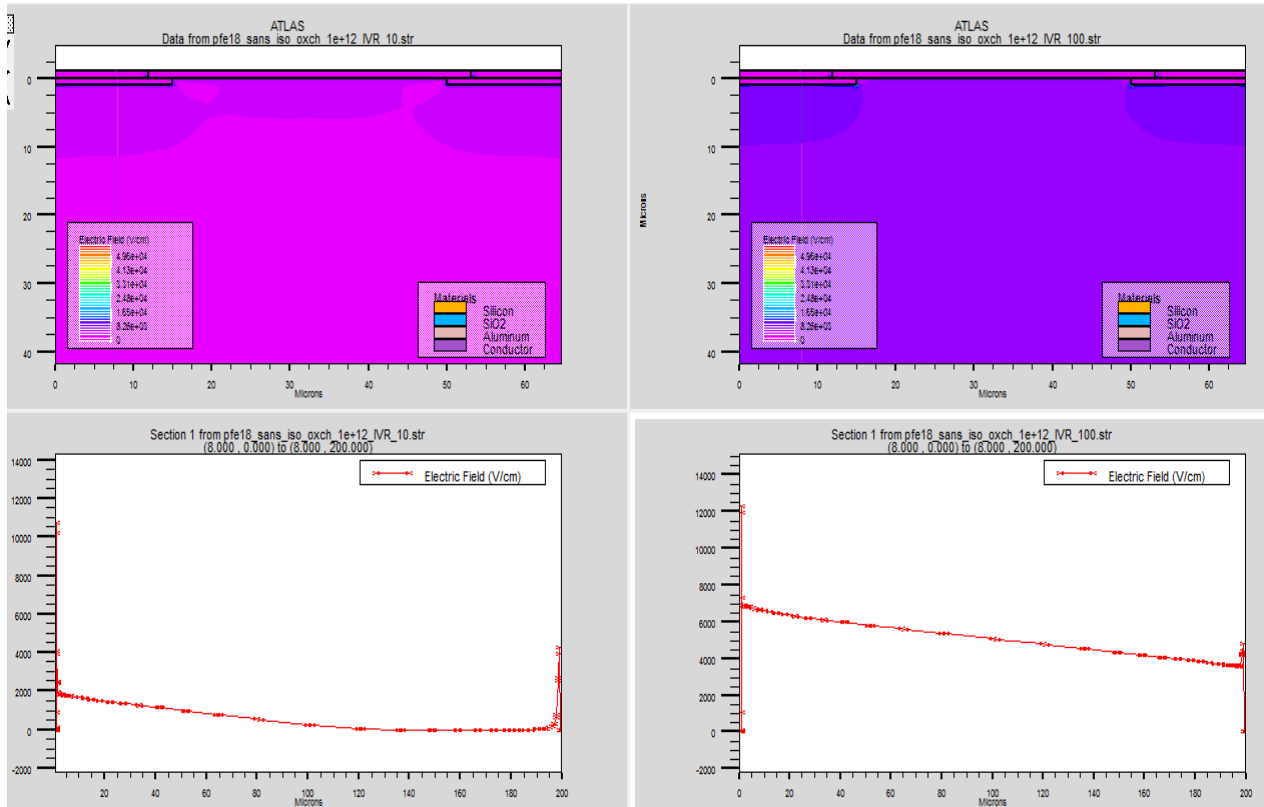


Figure 3.9 Représentation du champ électrique dans la structure (en haut) et son profil (en bas) avec une ligne de découpe au milieu du pixel avec une charge dans l'oxyde de 10^{12} cm^{-2} .

On remarque que le champ électrique augmente avec la tension de polarisation au niveau de la jonction. A 10 V, il est de 10700 V/cm et à 100 V il est de 12500 V//cm.

3.3. Structure p-stop

La figure (3.10) représente la structure du détecteur planaire avec une isolation de type p-stop. Un implant de type p avec une concentration de 10^{+17} cm^{-2} est inséré entre les deux pixels sur une profondeur de $1.5 \text{ }\mu\text{m}$. l'intérêt de cet implant est d'éviter le court-circuit entre les pixels.

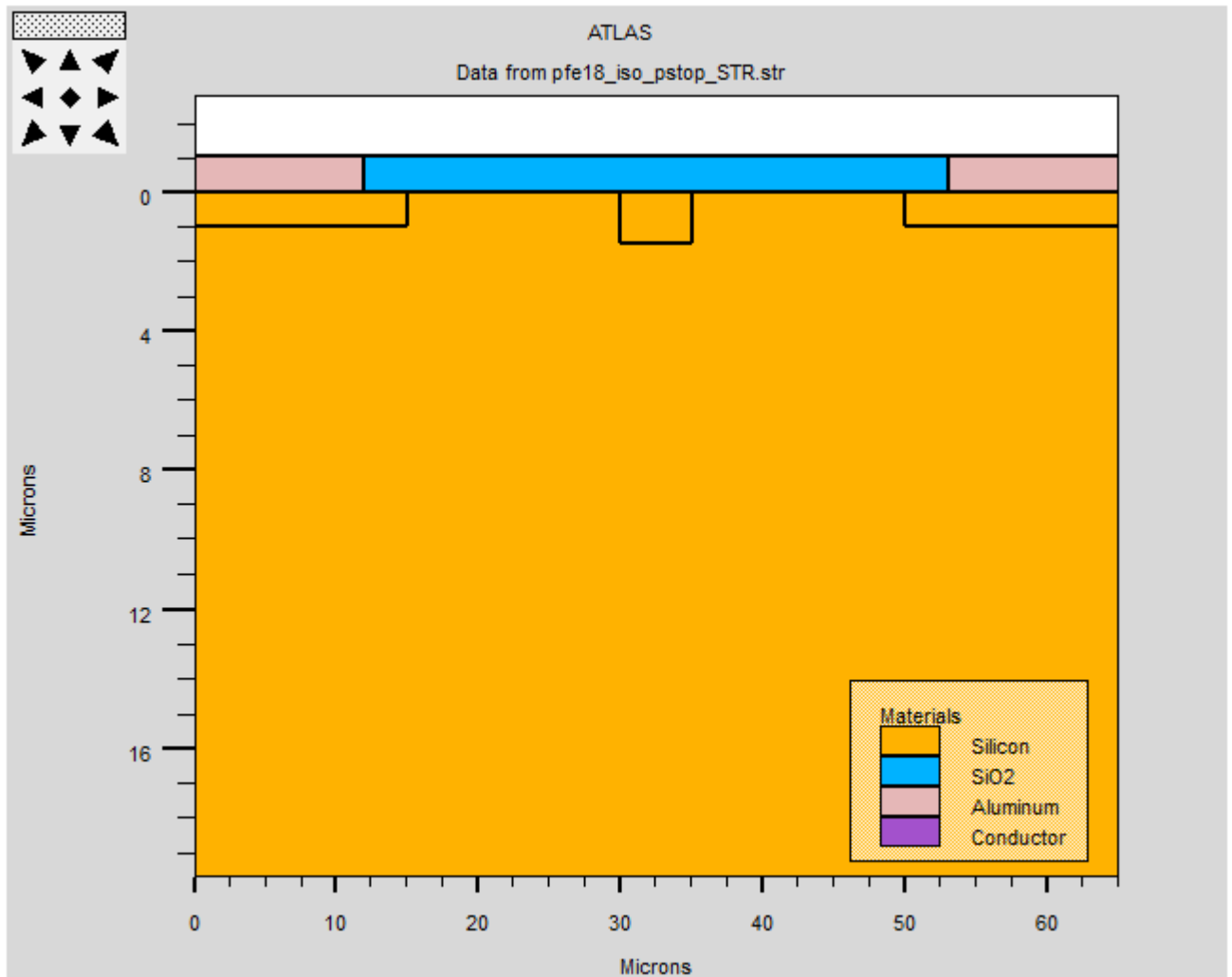


Figure 3.10 Représentation schématique de la structure p-stop.

3.3.1. Maillage

La figure (3.11) représente de maillage optimisé de la structure p-stop. Le maillage est plus raffiné au niveau des jonctions.

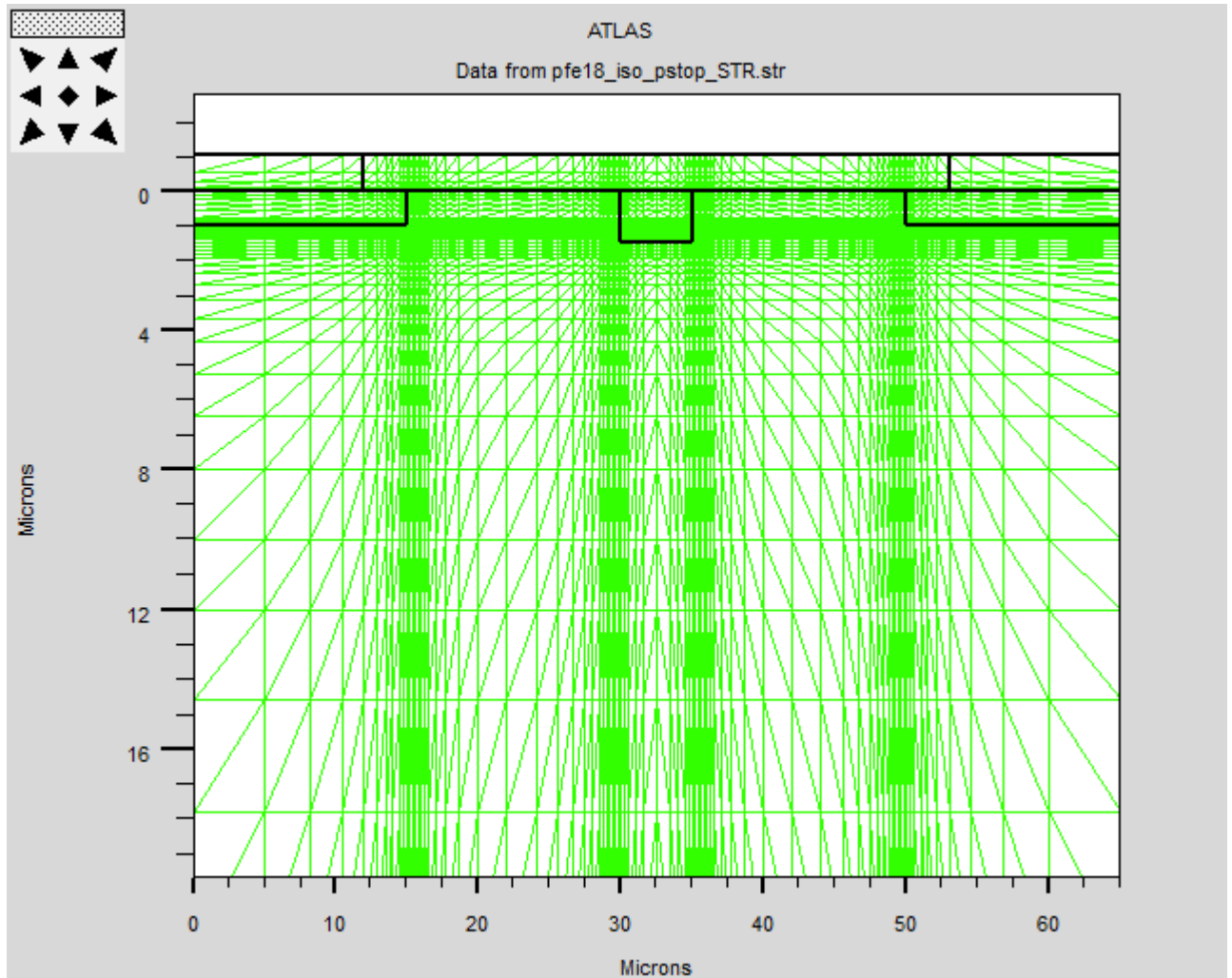


Figure 3.11 Schéma de maillage de structure.

3.3.2. Dopage sous ATLAS

La figure (3.12) représente le profil du dopage effectif dans la structure qui est la différence entre la concentration des accepteurs (N_A) moins la concentration des donneurs (N_D).

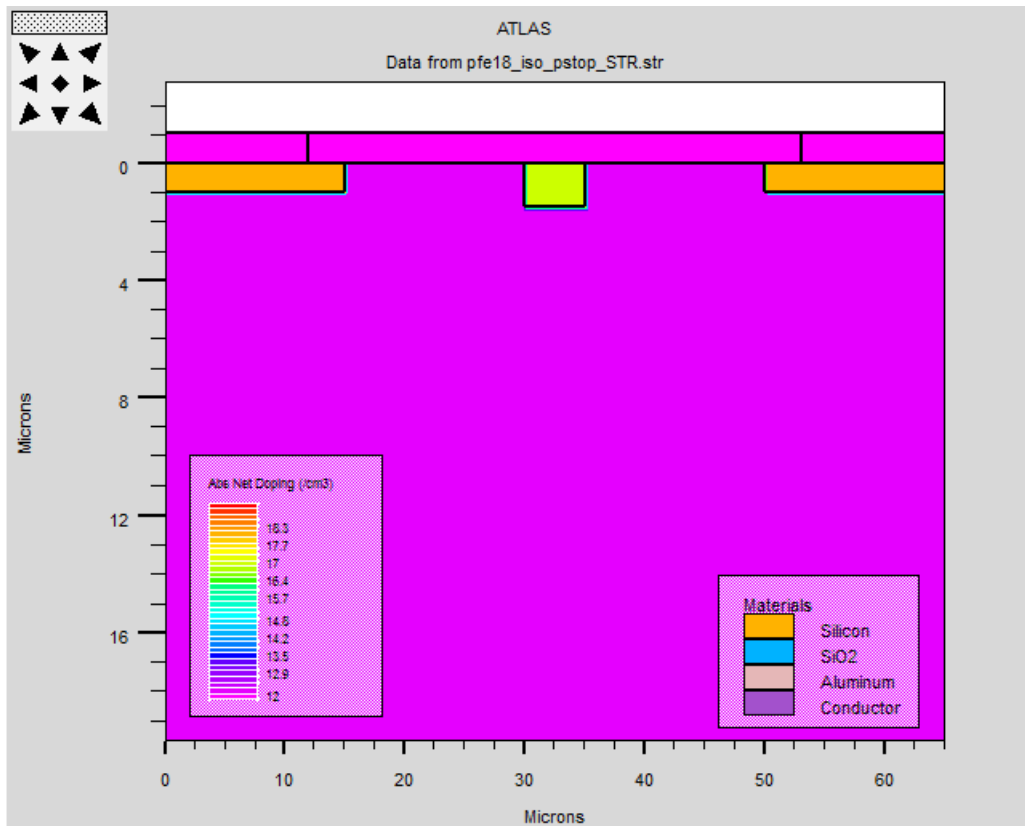


Figure 3.12 Représentation schématique de dopage sous ATLAS.

3.3.3. Effet de charge

a) Zone de charge d'espace

Pour pouvoir montrer l'évolution de la zone de charge d'espace sans charge et avec charges dans l'oxyde nous devons visualiser l'évolution de la concentration des porteurs libres de charges qui sont des trous dans notre cas. Pour cela, nous faisons une ligne de découpe au milieu de la structure. La figure (3.13) (sans charges) et la figure (3.14) (avec charges) montrent l'évolution de la zone de charge d'espace en fonction de la tension de polarisation pour deux valeurs de la tension de polarisation 10V et 100V.

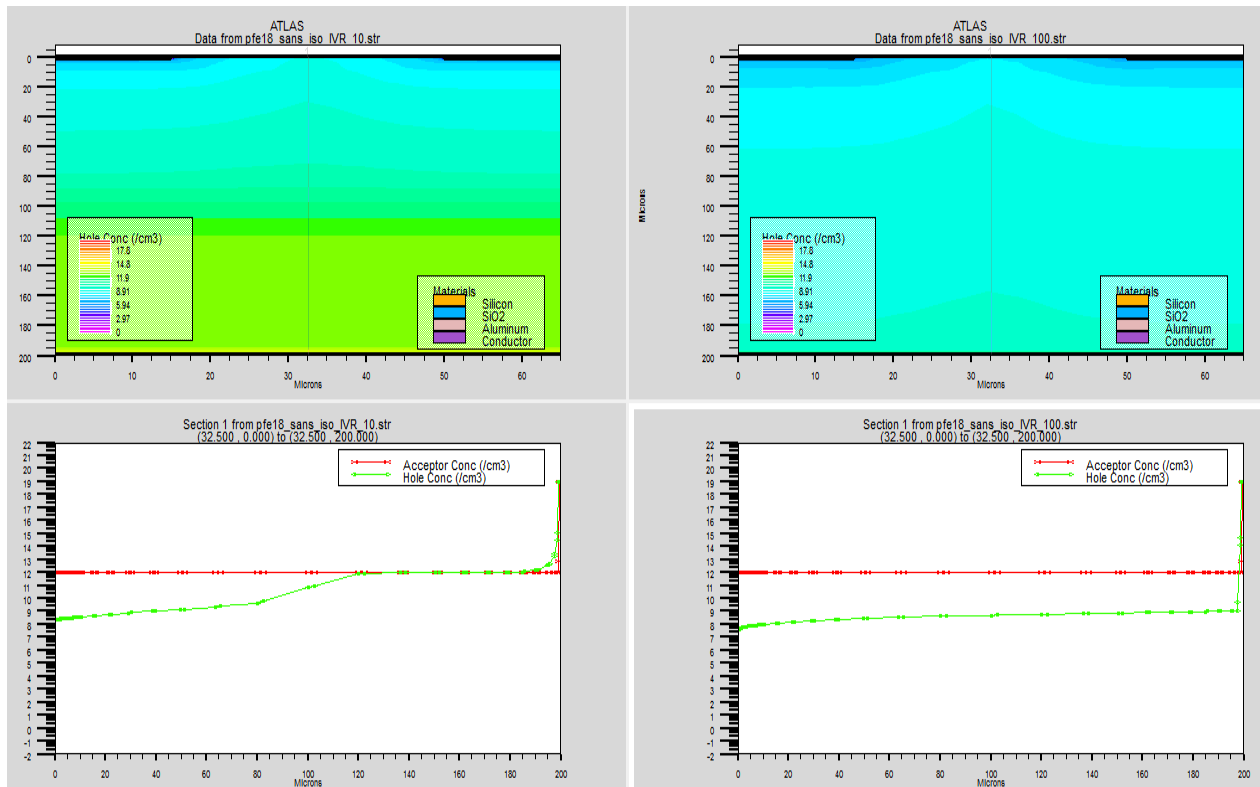


Figure 3.13 Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure sans charges dans l'oxyde.

La zone de charge d'espace augmente avec la tension de polarisation. Elle se développe de la jonction vers le fond de la structure. La zone de charge d'espace est déterminée par l'intersection de la concentration des trous avec la concentration des atomes accepteurs. A 10V, la zone de charge d'espace est à 120 μm pour les deux cas (sans et avec charge) alors qu'à 100 V elle est atteint le fond de la structure.

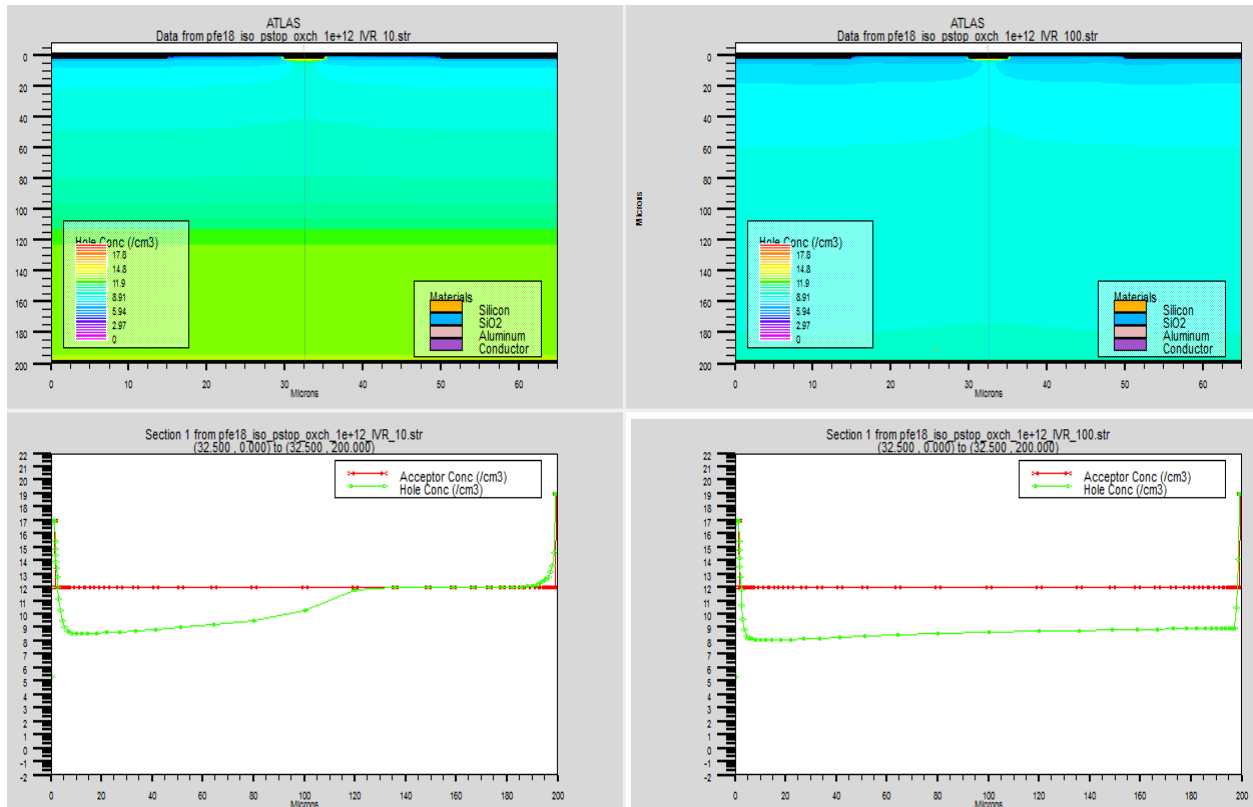


Figure 3.14 Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure avec une charge dans l'oxyde de 10^{+12} cm^{-2} .

b) Caractéristiques I-V

La figure (3.15) montre les caractéristiques courant-tension relatives à la structure présente sur la figure (3.10). Nous constatons que la tension de claquage augmente avec la charge présente dans l'oxyde. Cette augmentation est visible jusqu'à la valeur de 10^{+11} cm^{-2} , par la suite il n'y a aucune variation de la caractéristique I-V en fonction de la charge. Le courant est constant sur une large de gamme de polarisation.

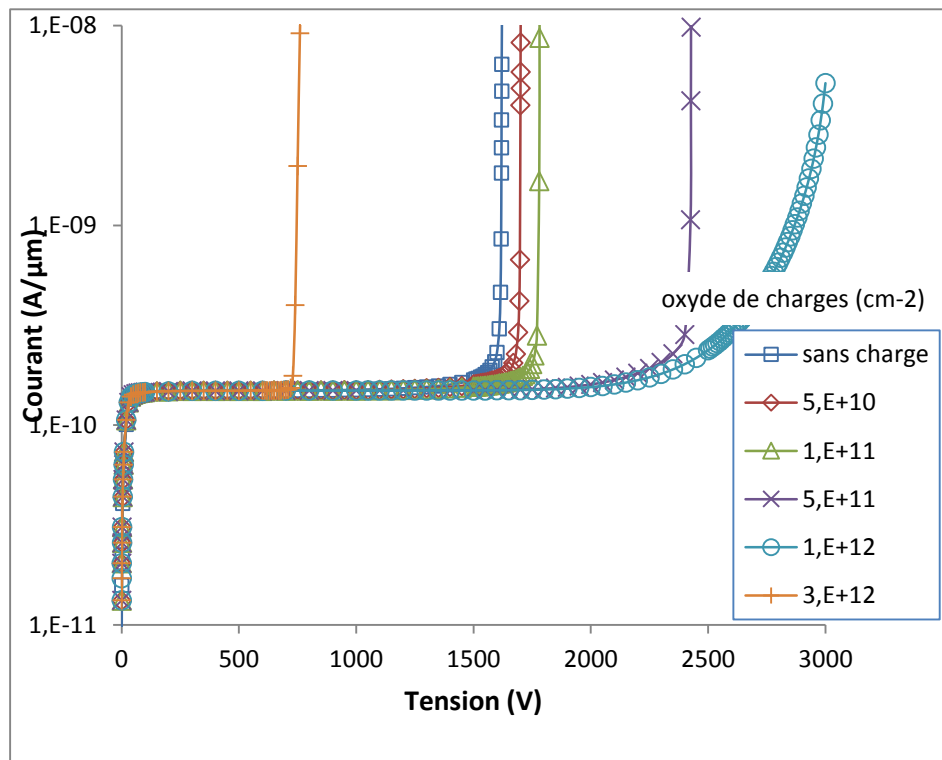


Figure 3.15 Caractéristique I-V de la structure p-stop.

c) Tension de claquage et courant de fuite

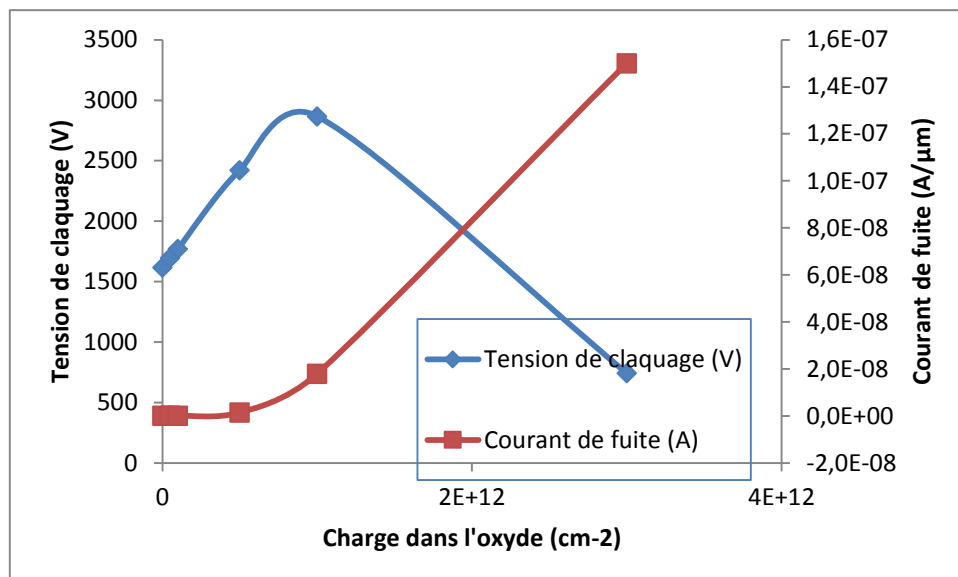


Figure 3.16 Variation de la tension de claquage et courant de fuite en fonction de la charge de l'oxyde.

d) Champ électrique

La figure (3.17) présente le champ électrique pour la structure p-stop et sans charges dans l'oxyde et la figure (3.18) présente le champ électrique avec charges dans l'oxyde pour deux tensions de polarisation de 10V (à gauche) et 100V (à droite). Dans les deux figures nous présentons aussi le profil du champ électrique de la structure de la figure (3.10) après une ligne de découpe verticale au milieu du pixel de gauche de la structure à 8 μm de la surface.

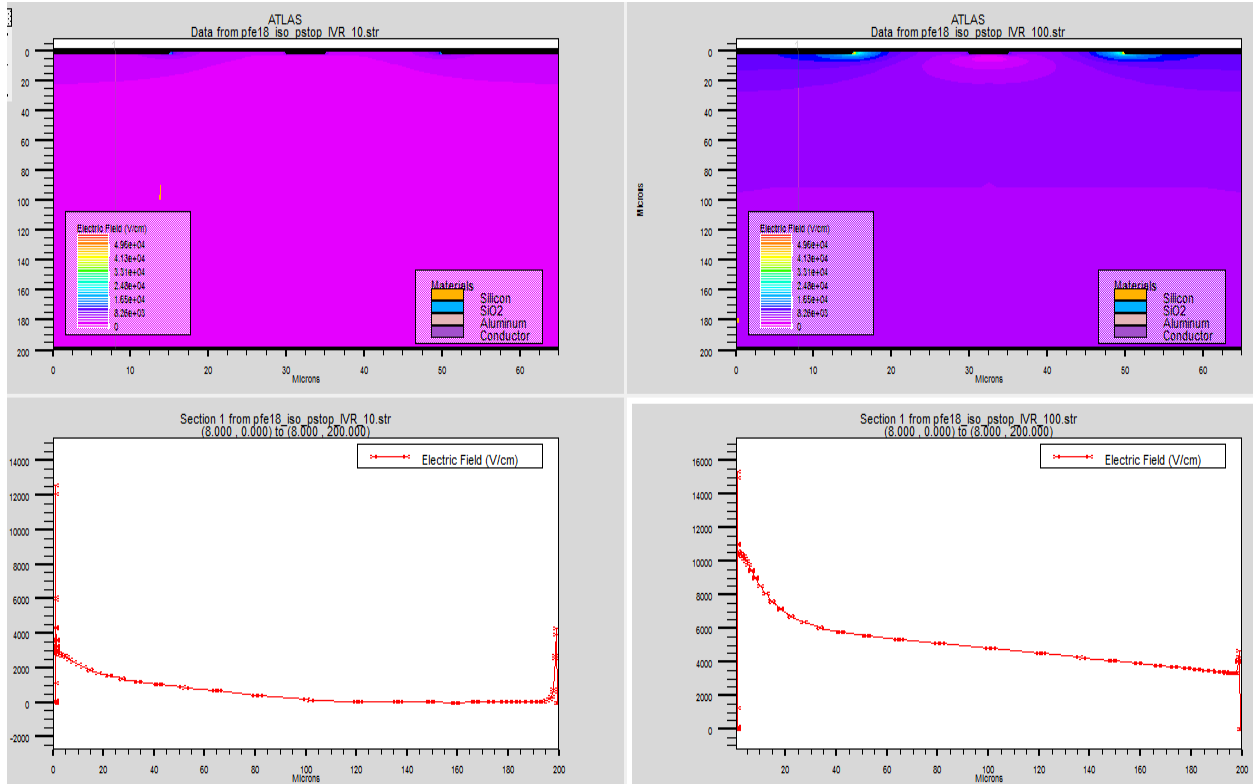


Figure 3.17 Représentation du champ électrique dans la structure (en haut) et son profil (en bas) avec une ligne de découpe au milieu du pixel sans charges dans l'oxyde.

On remarque que le champ électrique augmente avec la tension de polarisation au niveau de la jonction. A 10 V, il est de 12500 V/cm et à 100 V il est de 15500 V/cm.

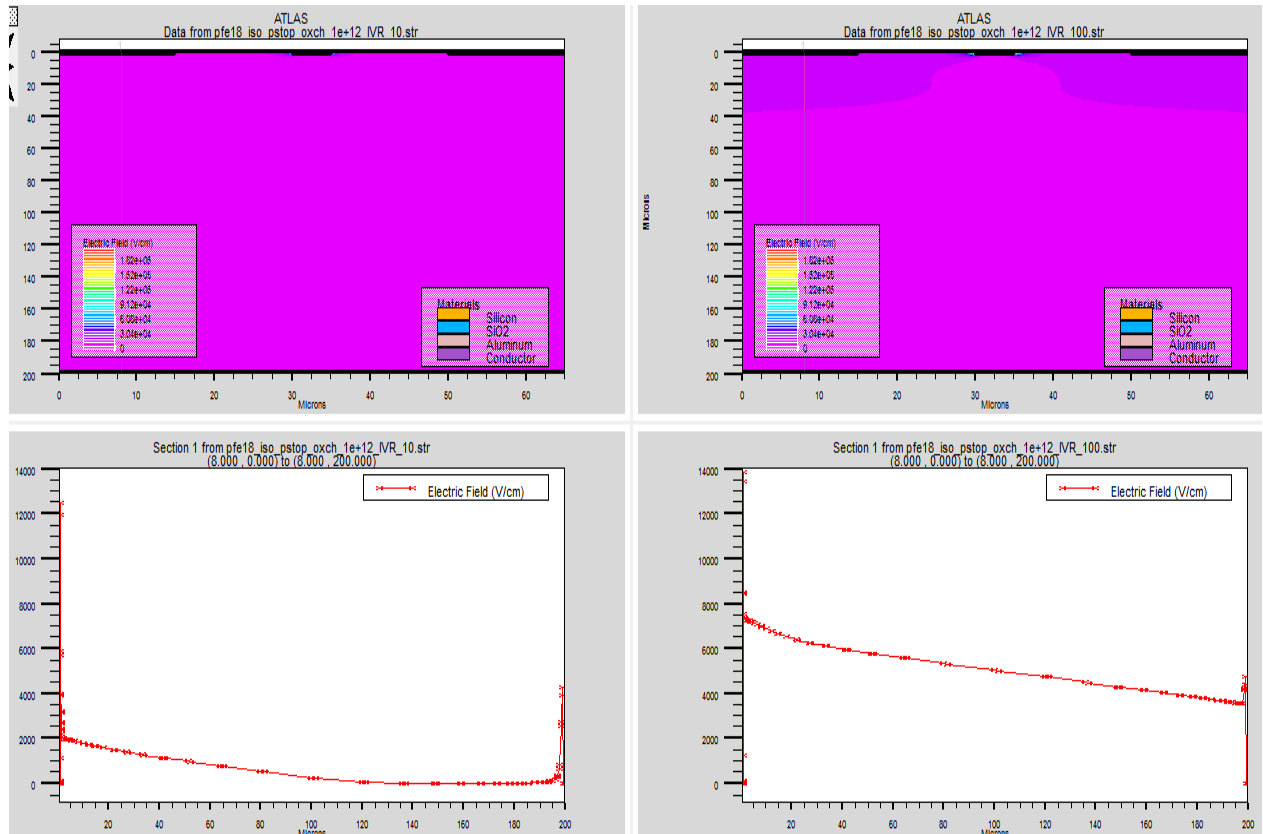


Figure 3.18 Représentation du champ électrique dans la structure (en haut) et son profil (en bas) avec une ligne de découpe au milieu du pixel avec une charge dans l'oxyde de 10^{12} cm^{-2} .

On remarque que le champ électrique augmente avec la tension de polarisation au niveau de la jonction. A 10 V, il est de 12500 V/cm et à 100 V il est de 13900 V//cm.

3.4. Structure p-spray

La figure (3.19) représente la structure du détecteur planaire avec une isolation de type p-spray. Un implant de type p avec une concentration de 10^{+16} cm^{-2} est inséré entre les deux pixels sur une profondeur de $0.5 \text{ }\mu\text{m}$. l'intérêt de cet implant est d'éviter le court-circuit entre les pixels.

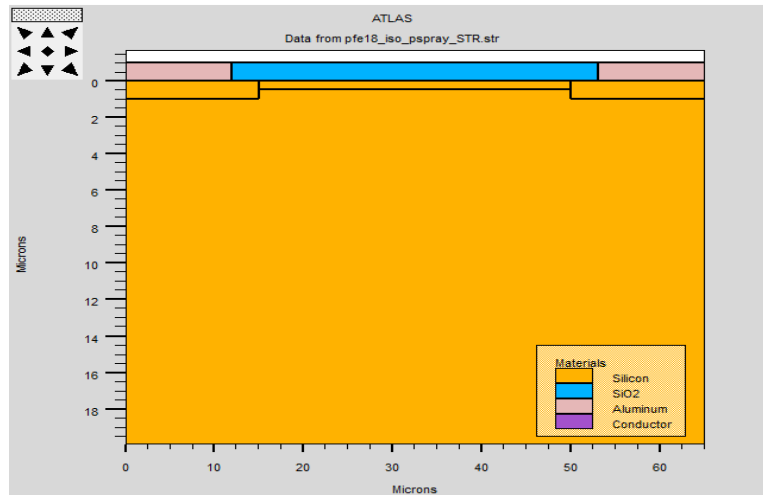


Figure 3.19 Représentation schématique de la structure p-spray

3.4.1. Maillage

La figure (3.20) représente de maillage optimisé de la structure p-spray. Le maillage est plus raffiné au niveau des jonctions.

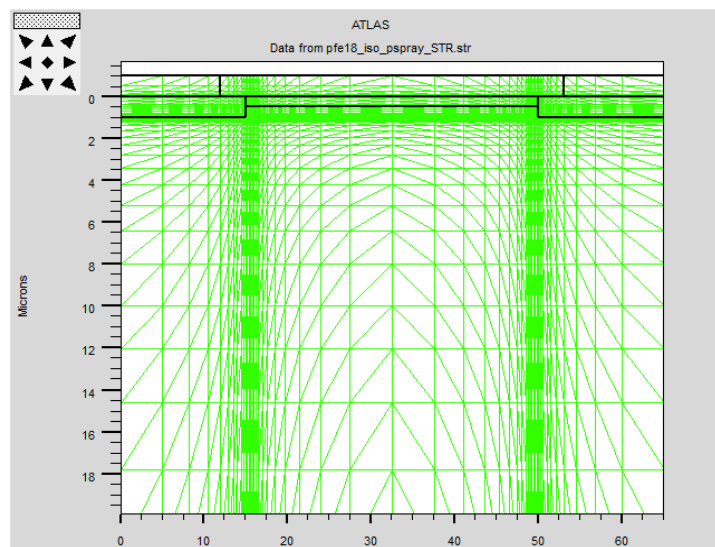


Figure 3.20 Schéma de maillage de structure.

3.4.2. Dopage sous Atlas

La figure (3.21) représente le profil du dopage effectif dans la structure qui est la différence entre la concentration des accepteurs (N_A) moins la concentration des donneurs (N_D).

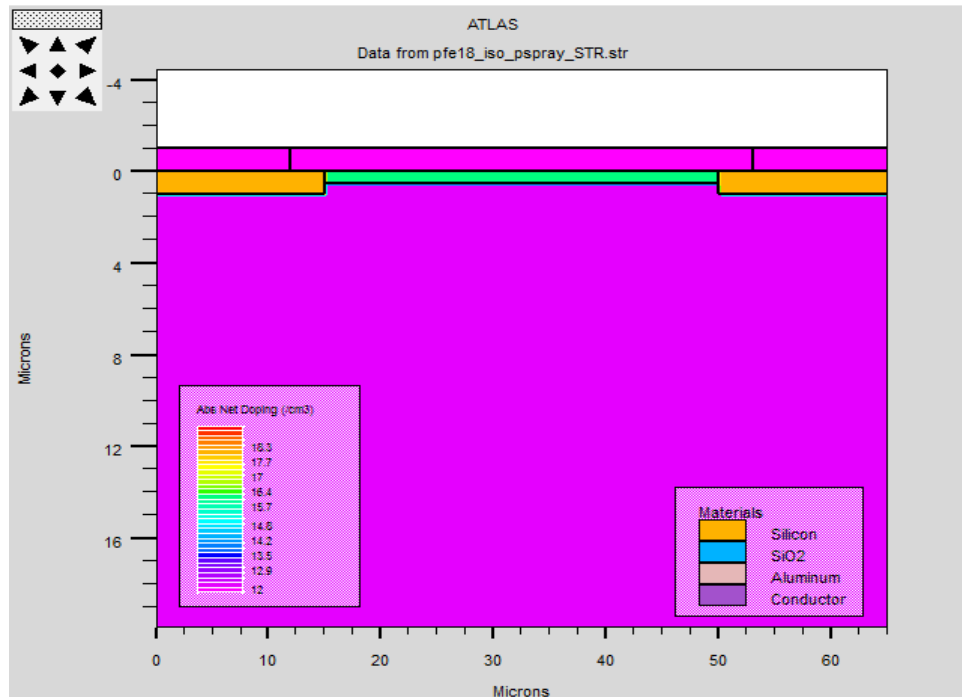


Figure 3.21 Représentation schématique de dopage p-spray sous ATLAS

3.4.3. Effet de charge

a) Zone de charge d'espace

Pour pouvoir montrer l'évolution de la zone de charge d'espace sans charge et avec charges dans l'oxyde nous devons visualiser l'évolution de la concentration des porteurs libres de charges qui sont des trous dans notre cas. Pour cela, nous faisons une ligne de découpe verticale au milieu de la structure. La figure (3.22) (sans charges) et la figure (3.23) (avec charges) montrent l'évolution de la zone de charge d'espace en fonction de la tension de polarisation pour deux valeurs de la tension de polarisation 10V et 100V.

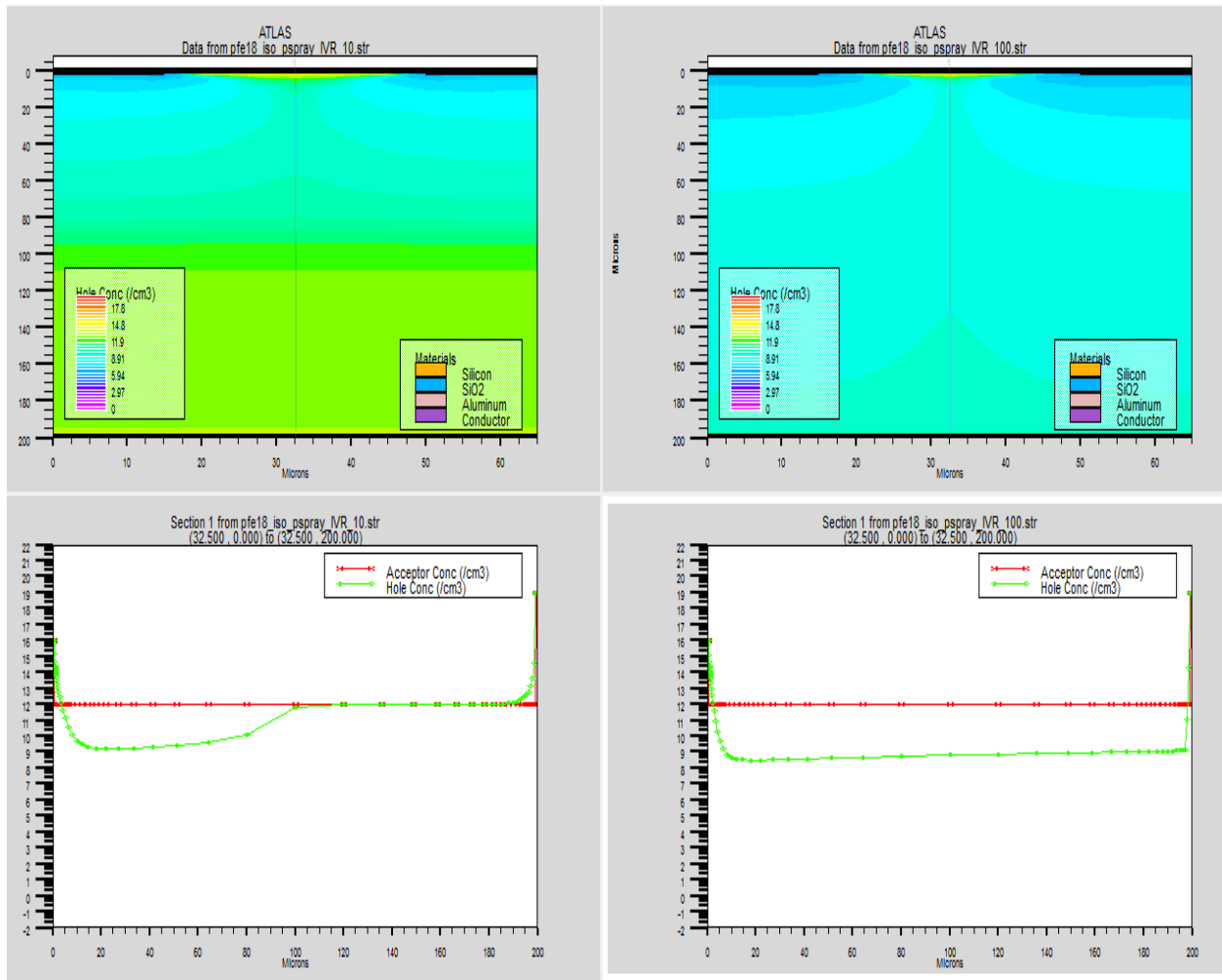


Figure 3.22 Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure sans charges dans l'oxyde.

La zone de charge d'espace augmente avec la tension de polarisation. Elle se développe de la jonction vers le fond de la structure. La zone de charge d'espace est déterminée par l'intersection de la concentration des trous avec la concentration des atomes accepteurs.

A 10V, la zone de charge d'espace est à 100 μm sans charge et 120 μm avec charge alors qu'à 100 V elle est atteint le fond de la structure.

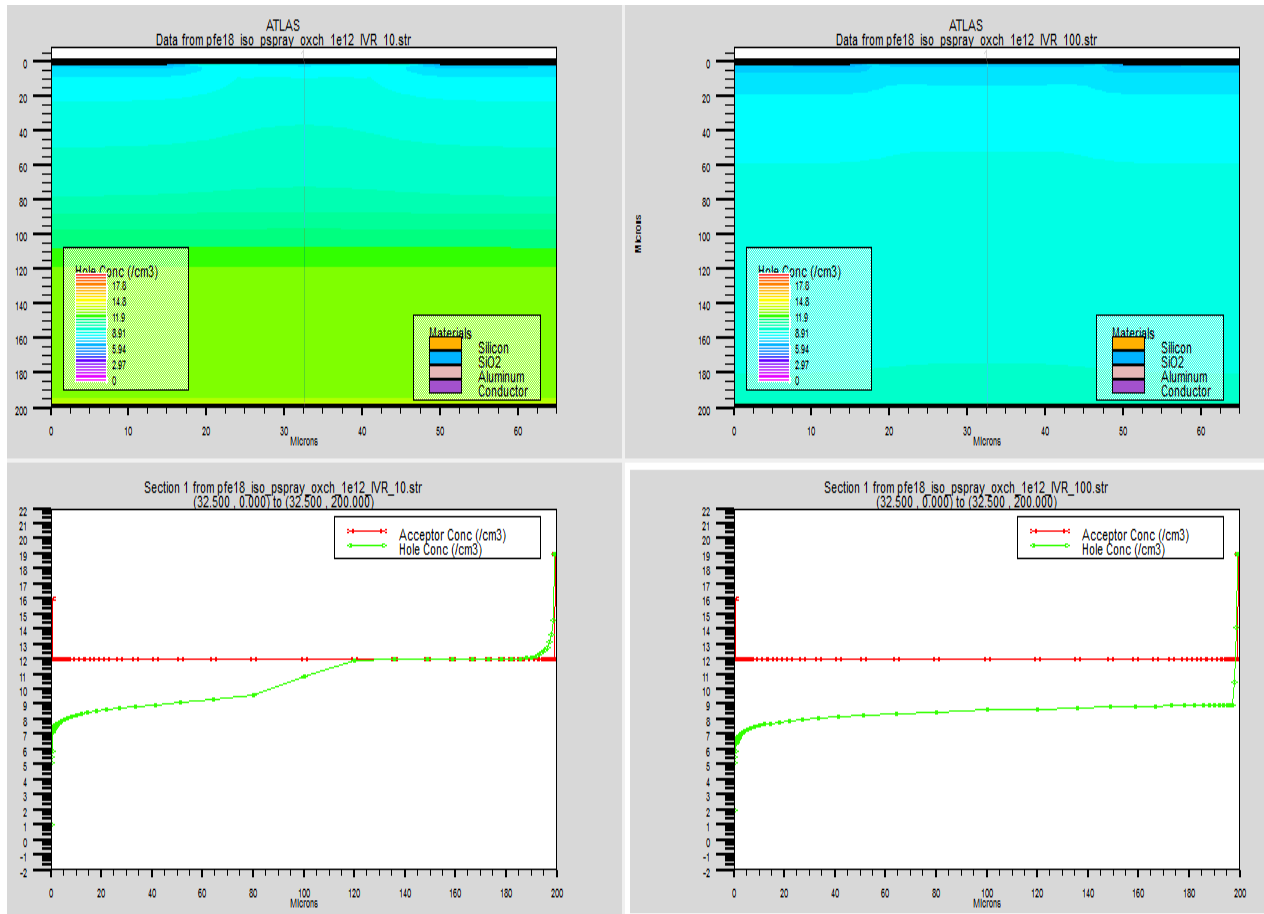


Figure 3.23 Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure avec une charge dans l'oxyde de 10^{+12} cm^{-2} .

b) Effet du dopage du p-spray

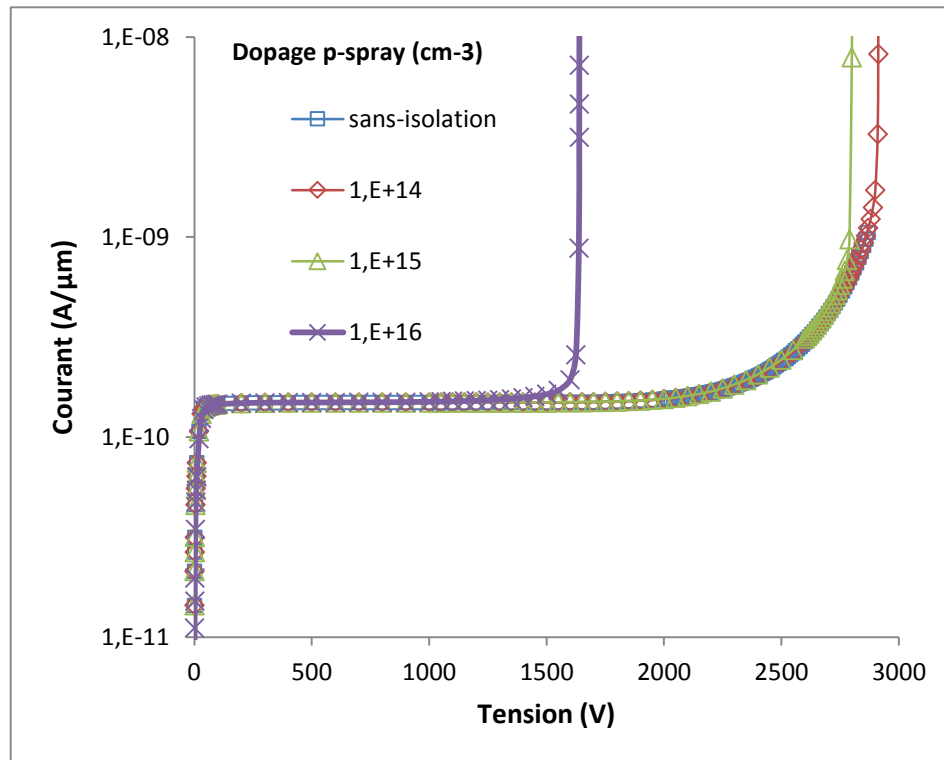


Figure 3.24 Caractéristique I-V de la structure p-spray pour différentes valeurs de dopage du p-spray.

c) Tension de claquage et courant de fuite

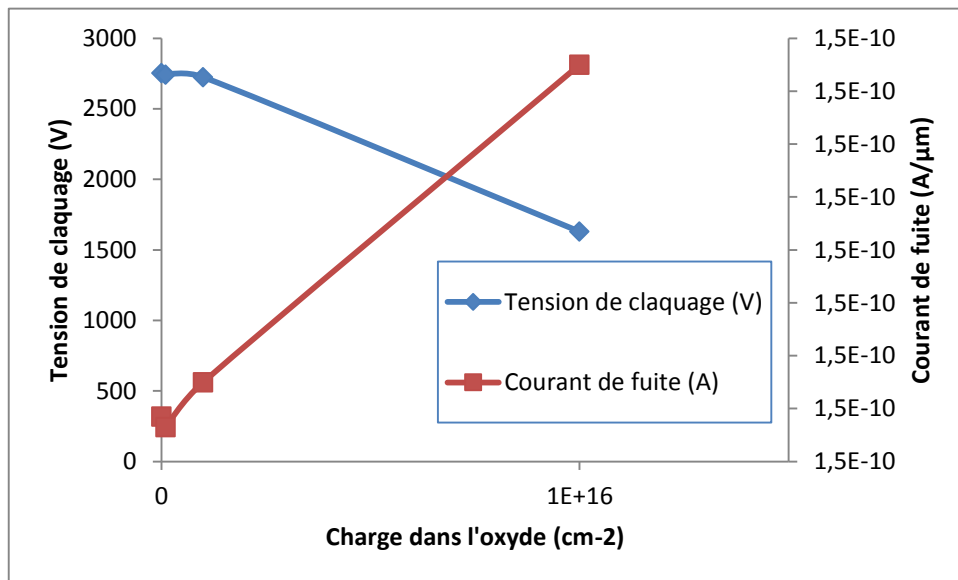


Figure 3.25 Evolution de la tension de claquage et du courant de fuite en fonction du dopage du p-spray.

d) Concentration des électrons

La figure (3.26) montre clairement l'intérêt porté à choisir le bon dopage du p-spray afin de contrecarrer la formation de la couche d'électrons surfacique.

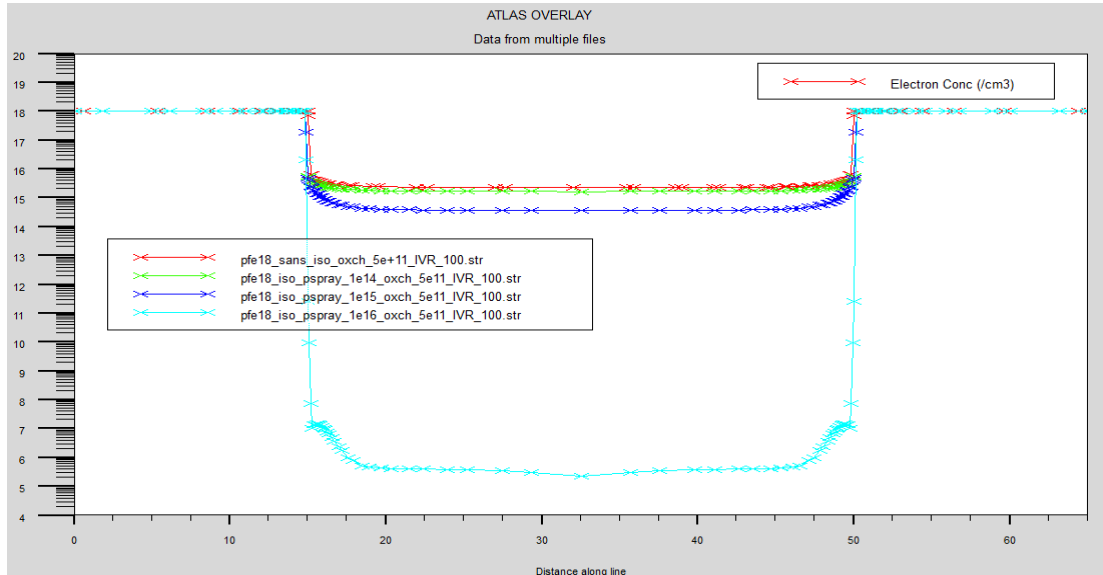


Figure 3.26 Profil de la concentration des électrons après une ligne de découpe horizontale à 0.1 μm de l'interface Si/SiO₂ pour différents dopage du p-spray.

e) Champ électrique

La figure (3.27) montre un pic très élevé du champ électrique au niveau de la jonction pour un dopage de 10^{+16} cm^{-3} .

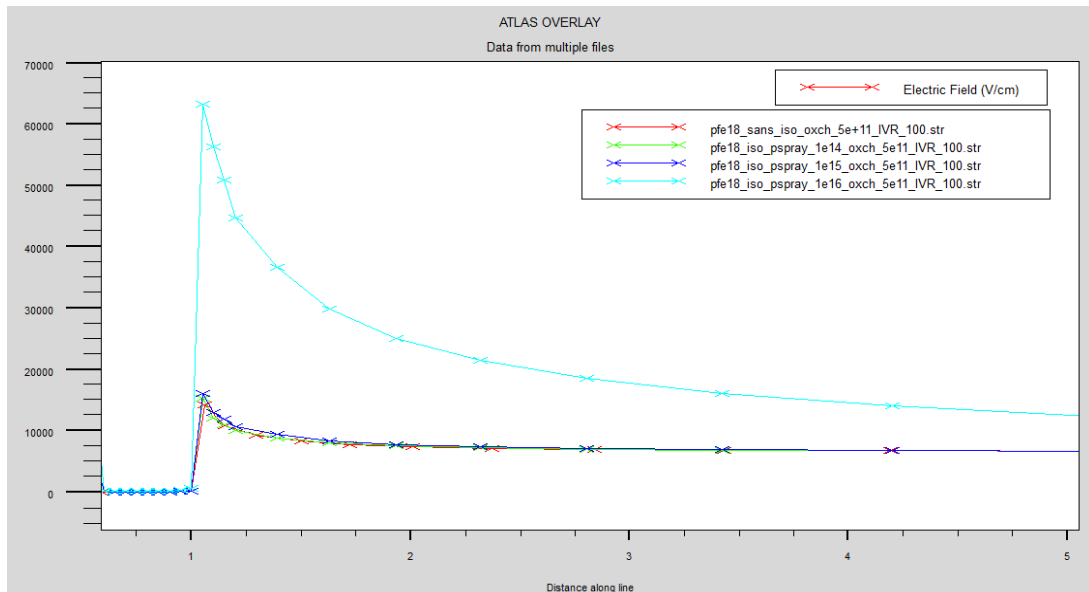


Figure 3.27 Profil du champ électrique.

3.5. Structure p-moderate

La figure (3.28) représente la structure du détecteur planaire avec une isolation de type p-moderate. Un implant de type p avec une concentration de 10^{+16} cm^{-2} est inséré entre les deux pixels sur une profondeur de $0.5 \text{ }\mu\text{m}$. un deuxième implant fixé aux milieux de la structure. Ses implants sont la combine entre les deux implants des structures précédents. l'intérêt de cet implant est d'éviter le court-circuit entre les pixels.

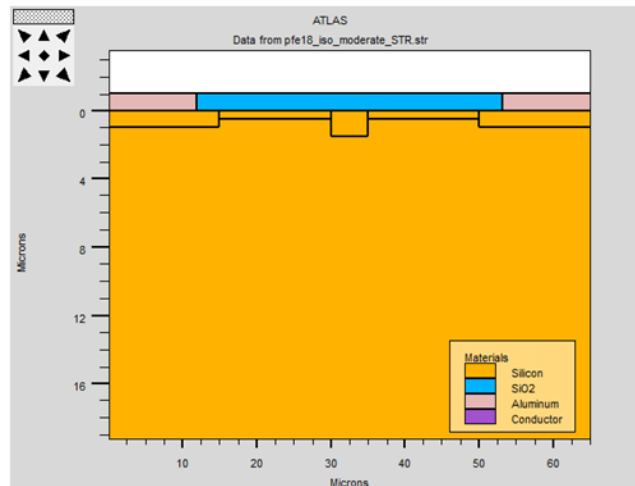


Figure 3.28 Représentation schématique de la structure sans-isolation.

3.5.1. Maillage

La figure (3.29) représente de maillage optimisé de la structure p-moderate. Le maillage est plus raffiné au niveau des jonctions.

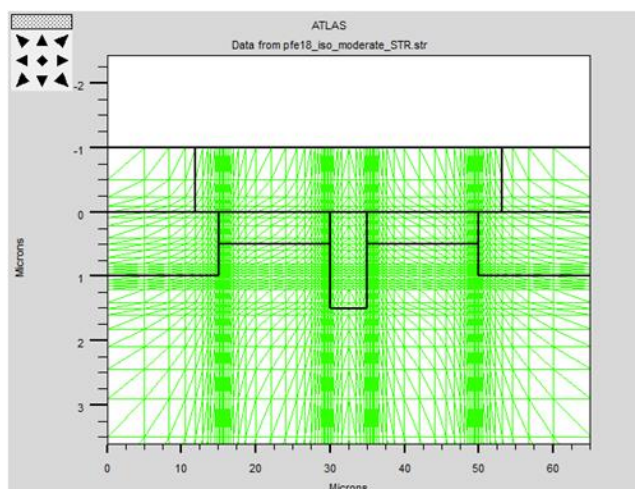


Figure 3.29 Schéma de maillage de structure.

3.5.2. Dopage sous ATLAS

La figure (3.30) représente le profil du dopage effectif dans la structure qui est la différence entre la concentration des accepteurs (N_A) moins la concentration des donneurs (N_D).

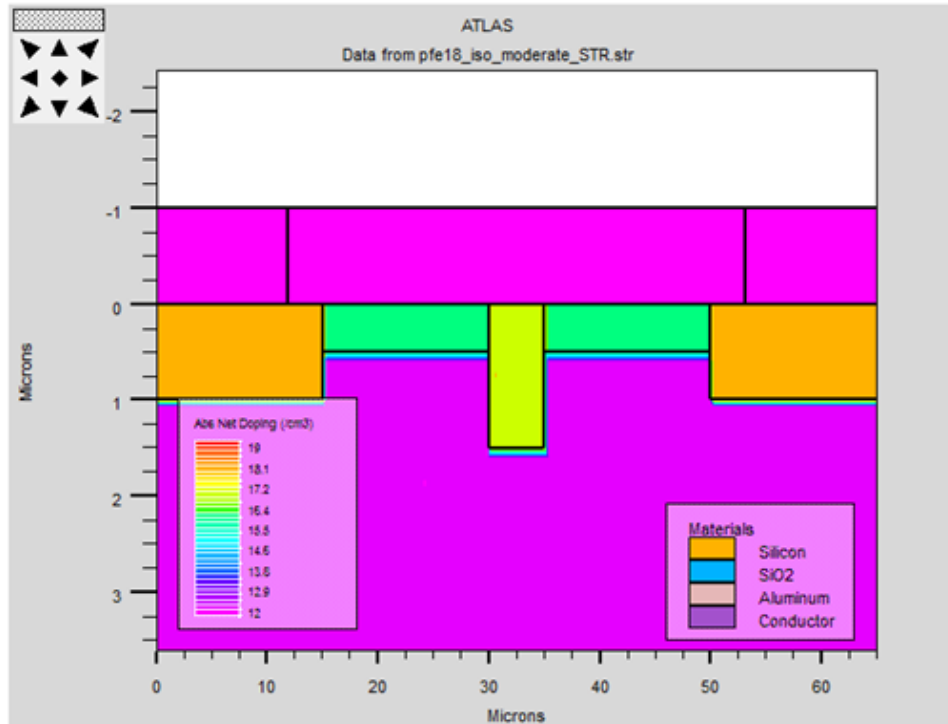


Figure 3.30 Représentation schématique de dopage sous ATLAS.

3.5.3. Effet de l'oxyde de charge

a) Zone de charge d'espace

Pour pouvoir montrer l'évolution de la zone de charge d'espace sans charge et avec charges dans l'oxyde nous devons visualiser l'évolution de la concentration des porteurs libres de charges qui sont des trous dans notre cas. Pour cela, nous faisons une ligne de découpe verticale au milieu de la structure. La figure 3.31 (sans charges) et la figure 3.32 (avec charges) montrent l'évolution de la zone de charge d'espace en fonction de la tension de polarisation pour deux valeurs de la tension de polarisation 10V et 100V.

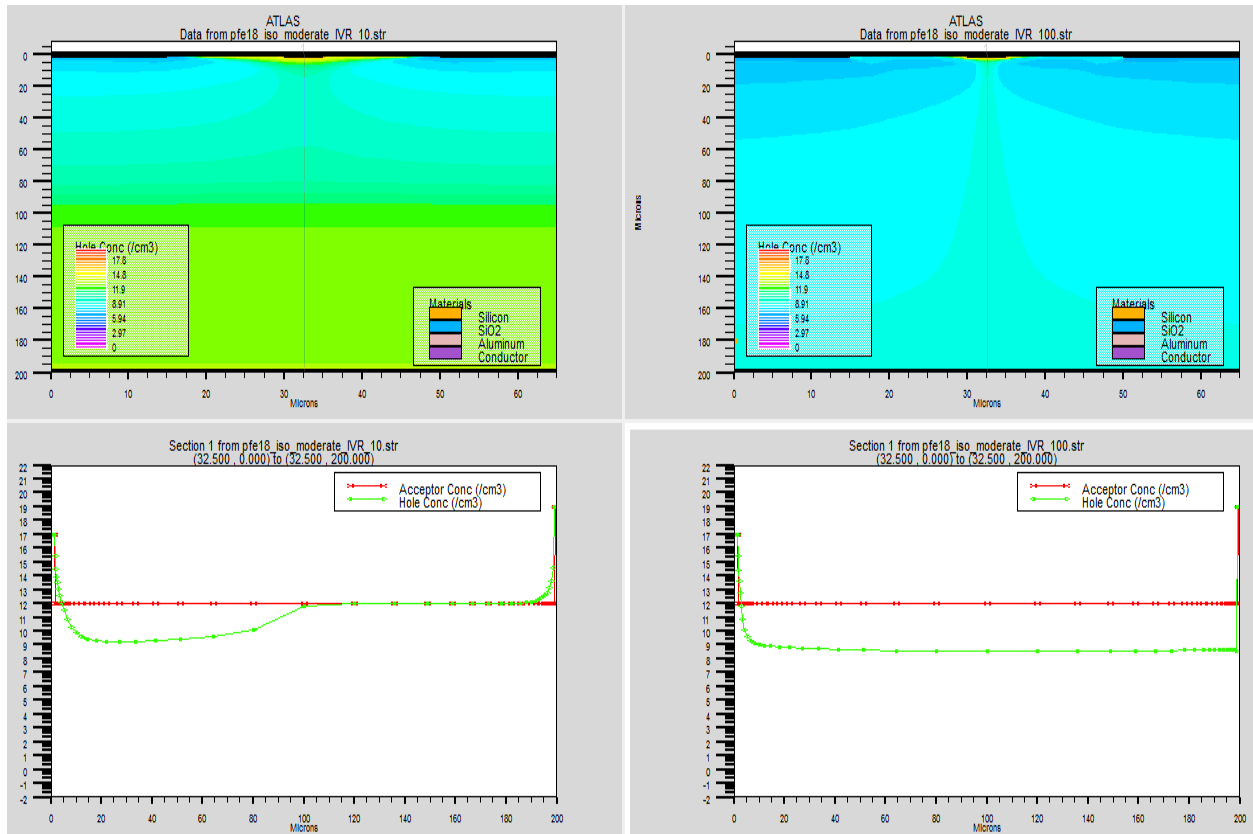


Figure 3.31 Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure sans charges dans l'oxyde.

La zone de charge d'espace augmente avec la tension de polarisation. Elle se développe de la jonction vers le fond de la structure. La zone de charge d'espace est déterminée par l'intersection de la concentration des trous avec la concentration des atomes accepteurs.

A 10V, la zone de charge d'espace est à 100 μm sans charge et 120 μm avec charge alors qu'à 100 V elle atteint le fond de la structure.

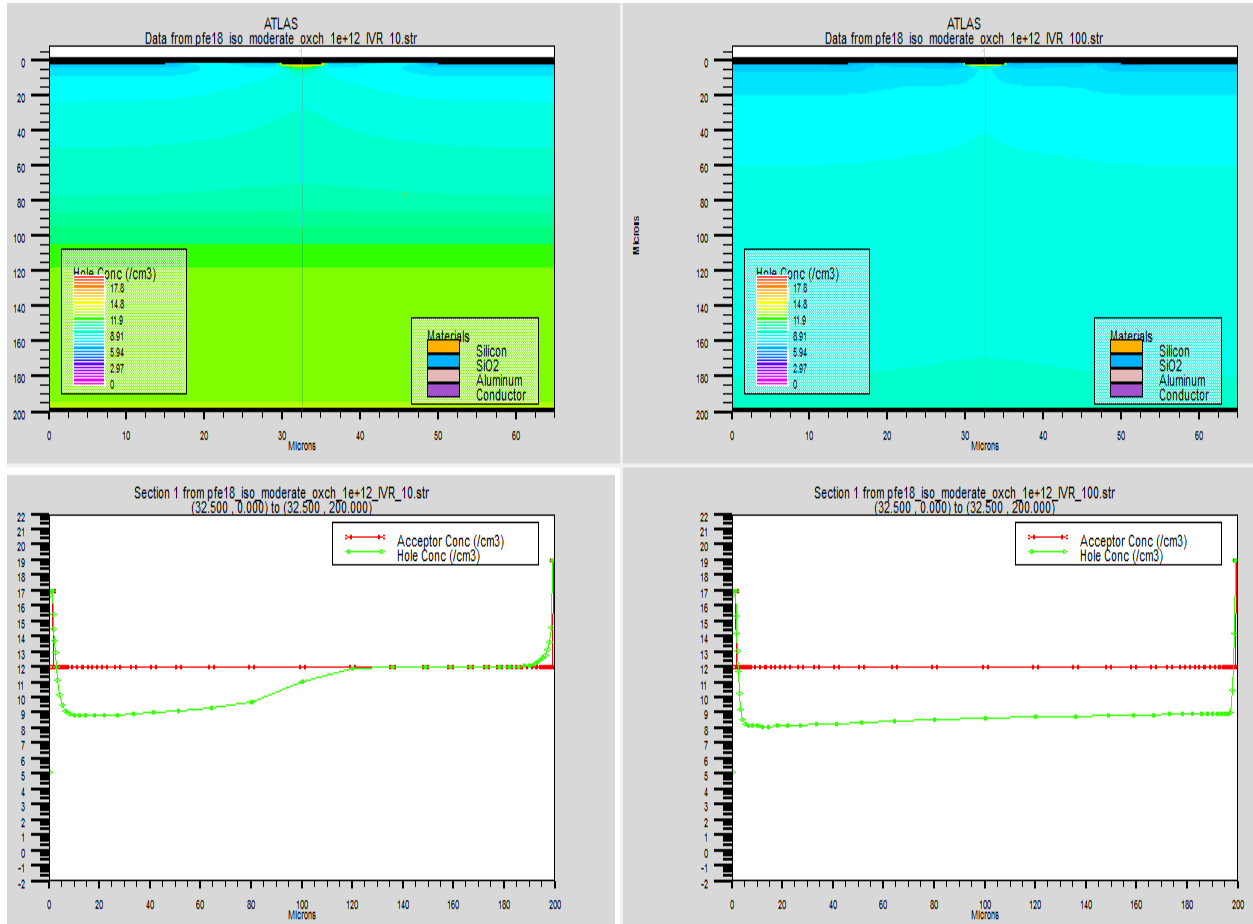


Figure 3.32 Représentation de la zone de charge d'espace (en haut) et la concentration des trous (en bas) de la structure avec une charge dans l'oxyde de 10^{+12} cm⁻².

b) Caractéristiques I-V

La figure (3.33) montre les caractéristiques courant-tension relatives à la structure présente sur la figure (3.28). Nous constatons que la tension de claquage augmente avec la charge présente dans l'oxyde. Cette augmentation est visible jusqu'à la valeur de 10^{+11} cm⁻², par la suite il n'y a aucune variation de la caractéristique I-V en fonction de la charge. Le courant est constant sur une large de gamme de polarisation.

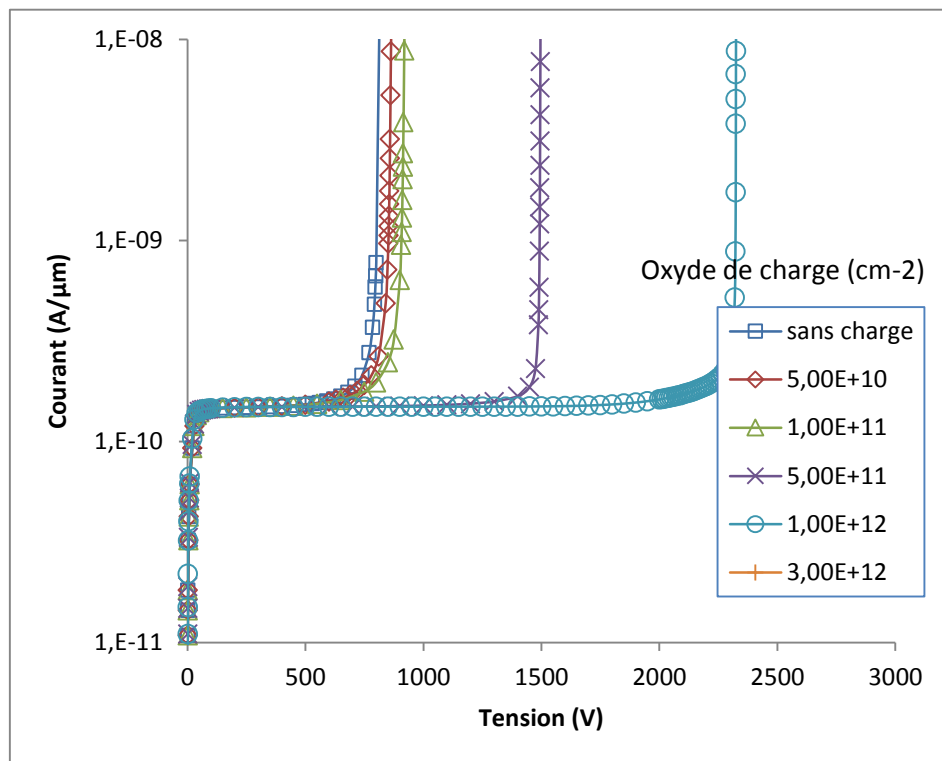


Figure 3.33 Caractéristiques I-V de la structure p-moderate pour différentes charges dans l'oxyde.

c) Tension de claquage et courant de fuite

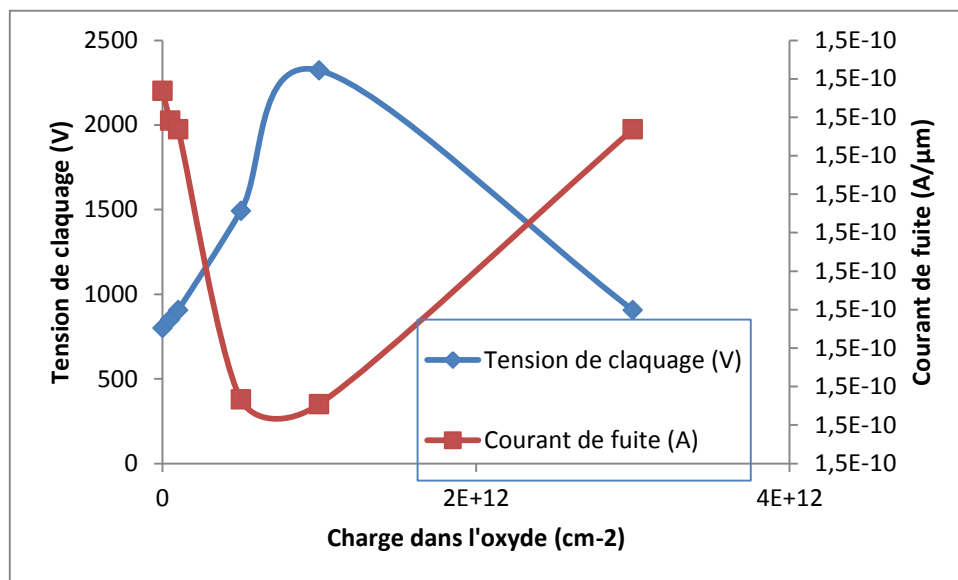


Figure 3.34 Variation de la tension de claquage (à gauche) et du courant de fuite (à droite) en fonction de la charge dans l'oxyde.

d) Champ électrique

La figure (3.35) présente le champ électrique pour la structure p-moderate sans charges dans l'oxyde et la figure (3.36) présente le champ électrique avec charges dans l'oxyde pour deux tensions de polarisation de 10V (à gauche) et 100V (à droite). Dans les deux figures nous présentons aussi le profil du champ électrique de la structure de la figure (3.28) après une ligne de découpe verticale au milieu du pixel de gauche de la structure à 8 μm de la surface.

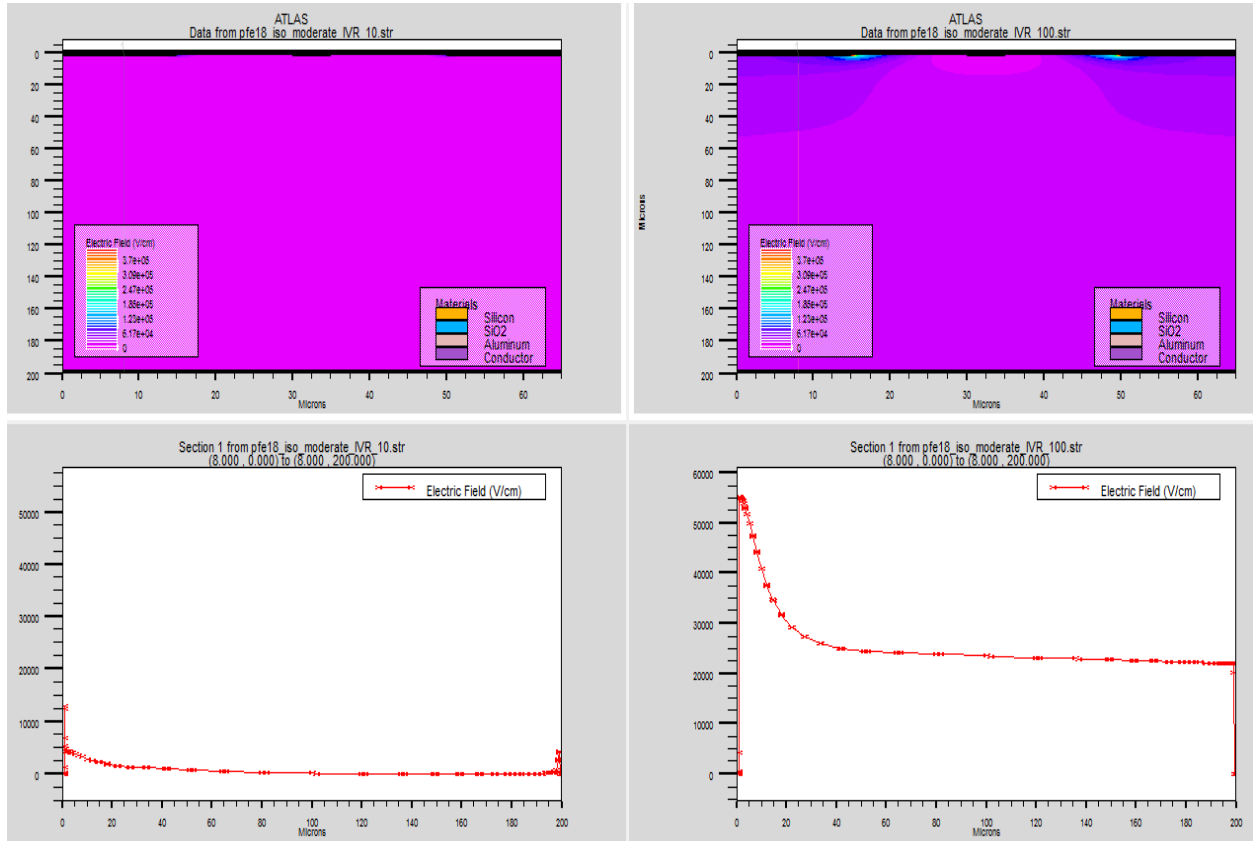


Figure 3.35 Représentation du champ électrique dans la structure (en haut) et son profil (en bas) avec une ligne de découpe au milieu du pixel sans charges dans l'oxyde.

On remarque que le champ électrique augmente avec la tension de polarisation au niveau de la jonction. A 10 V, il est de 12500 V/cm et à 100 V il est de 55500 V/cm.

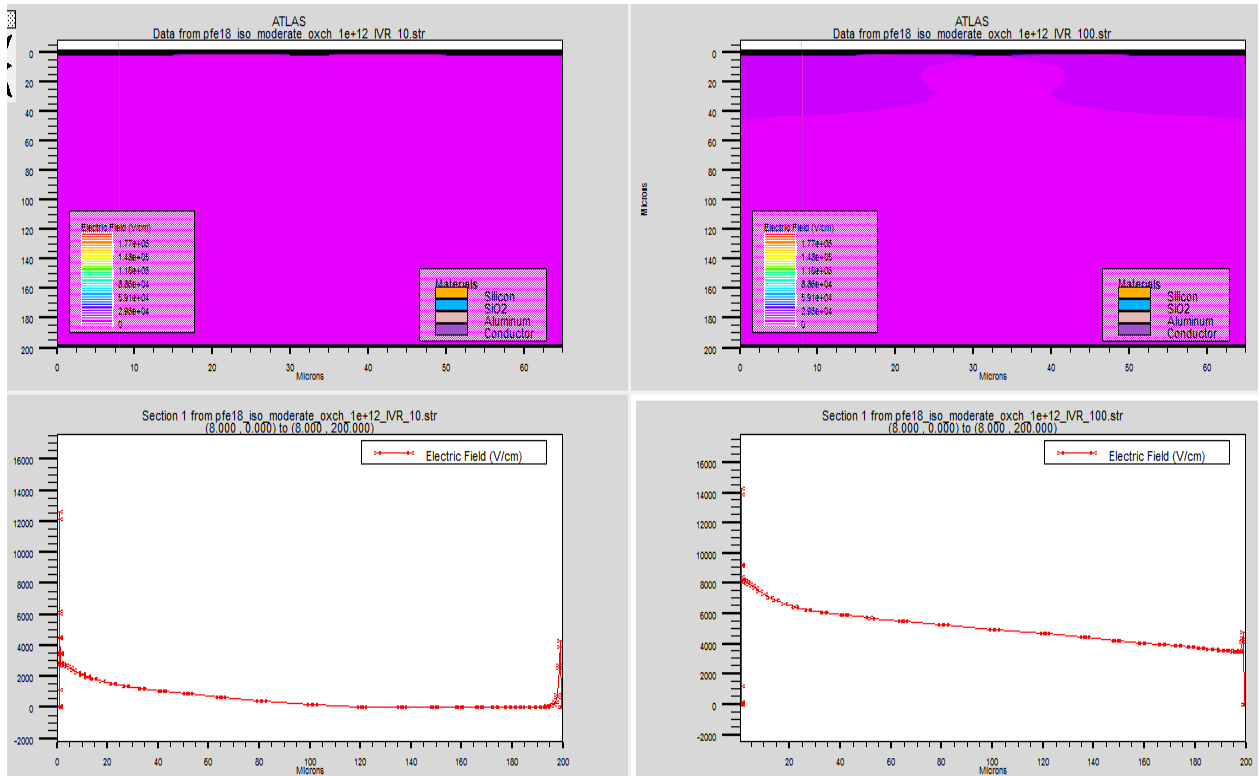


Figure 3.36 Représentation du champ électrique dans la structure (en haut) et son profil (en bas) avec une ligne de découpe au milieu du pixel avec charges dans l'oxyde.

On remarque que le champ électrique augmente avec la tension de polarisation au niveau de la jonction. A 10 V, il est de 12500 V/cm et à 100 V il est de 14500 V/cm.

3.6. Etude comparative

La figure (3.37) représente les caractéristiques I-V pour les structures sans isolation, p-stop, p-spray et p-moderate.

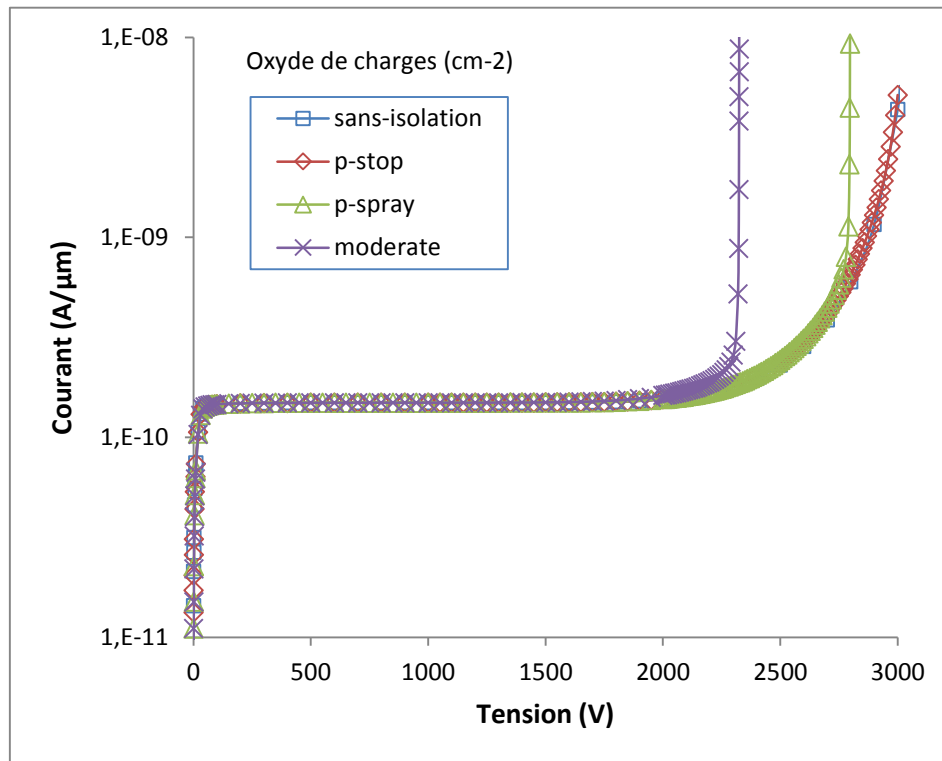


Figure 3.37 Représentation des caractéristiques I-V pour les différentes structures pour une charge d'oxyde de 10^{+12} cm^{-2} : sans isolation, p-stop, p-spray et p-moderate.

La figure (3.38) représente la concentration des électrons dans les différentes structures pour une tension de polarisation de 100V pour les structures sans isolation, p-stop, p-spray et p-moderate.

Chapitre 3: Résultats et simulation

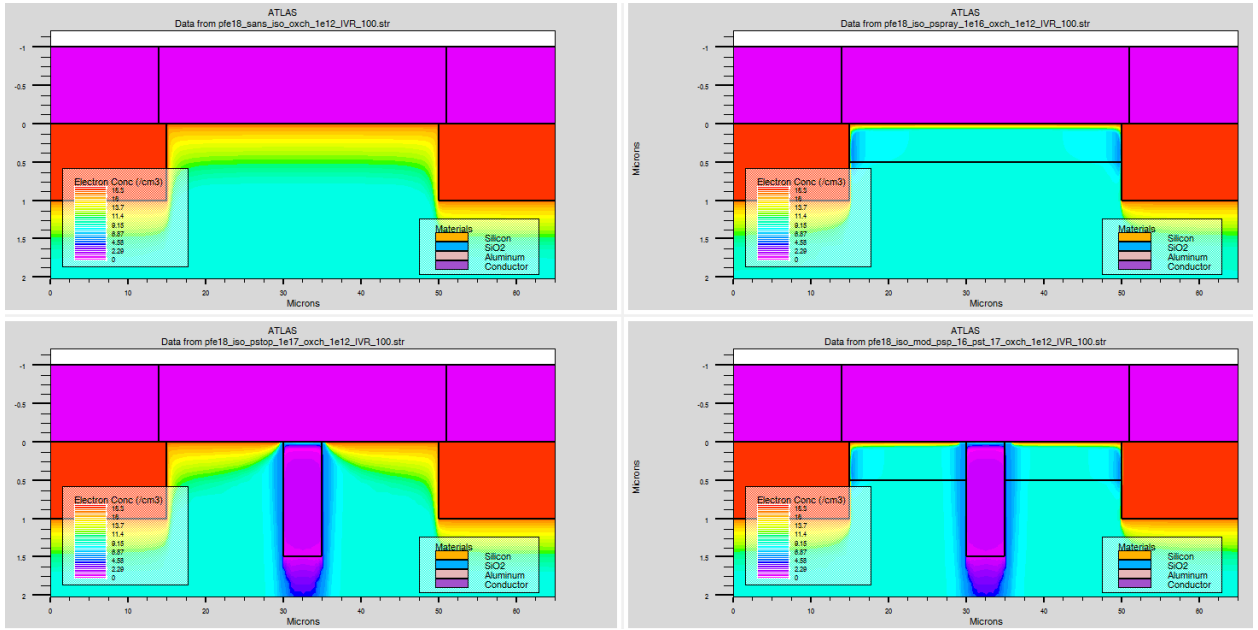


Figure 3.38 Représentation de la concentration des électrons dans les différentes structures pour une tension de polarisation de 100V. a) sans isolation, b) p-stop, c) p-spray et d) p-moderate.

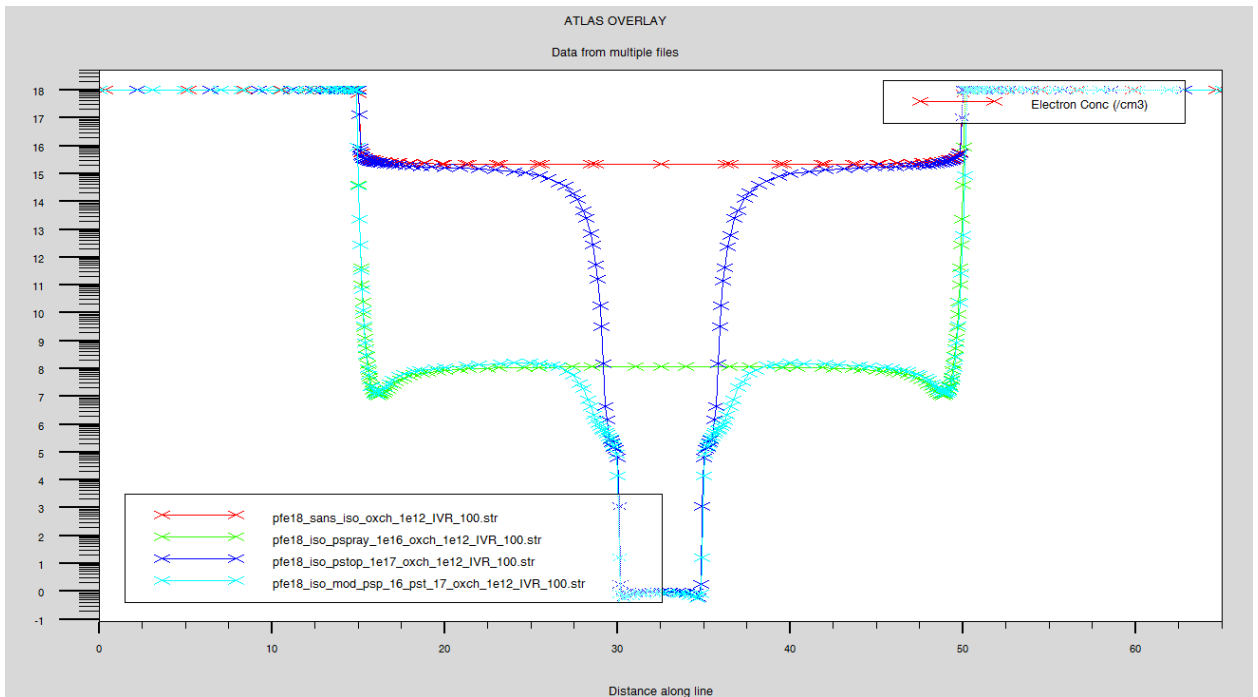


Figure 3.39 Représentation du profil de la concentration des électrons selon l'axe des x à une distance de 0.1 μm en dessous de l'interface Si/SiO₂ dans les différentes structures pour une tension de polarisation de 100V et une charge de 10^{+12} cm^{-2} .

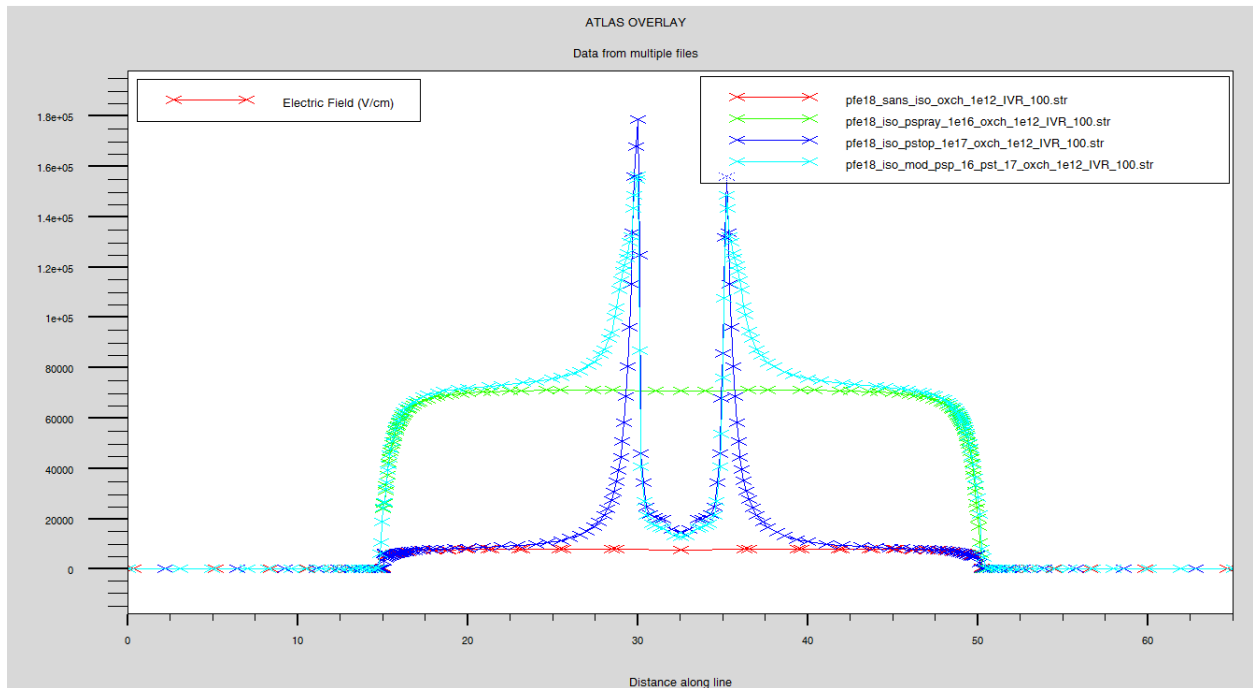


Figure 3.40 Représentation du champ électrique selon l'axe des x à une distance de 0.1 μm en dessous de l'interface Si/SiO₂ dans les différentes structures pour une tension de polarisation de 100V et une charge de 10^{+12} cm^{-2} .

3.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude sur les performances électrique d'un détecteur planaire sans et avec charge dans l'oxyde. Cette étude a été effectuée à l'aide de l'outil de simulation ATLAS du logiciel SILVACO.

Nous avons fait une étude comparative pour différents types d'isolation entre les pixels. Pour cela, on a étudié l'influence du type d'isolation sur les caractéristiques courant-tension. Le courant de fuite est quasiment indépendant du type d'isolation par contre la tension de claquage elle est influencée. Nous avons remarqué que la valeur du dopage est très critique si on veut s'affranchir de la couche d'électrons formée en dessous de l'interface Si/SiO₂.

Conclusion générale

L'étude présentée dans ce travail concerne une étude préliminaire sur un détecteur planaire dédié pour la détection de particules suite à de fortes radiations. Ce type de détecteur est amené à être au plus près du point d'impact des particules dans le grand collisionneur de hadrons (LHC) au niveau du CERN à Genève.

Cette étude a été menée à l'aide des outils de simulation technologique TCAD de SILVACO et principalement l'outil Atlas. Ce dernier est dédié pour la simulation électrique des composants électroniques et leur modélisation afin de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu, transitoire ou fréquentiel. En plus il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les concentrations des porteurs, le champ électrique ou le potentiel, etc.

Lorsque le détecteur est soumis à de fortes radiations des charges positives s'accumulent dans l'oxyde de silicium. Ces derniers attirent des électrons à la surface qui vont créer une couche conductrice parasite entre les pixels dans un substrat de type p. Ceci a été l'objet de notre travail en modélisant ces charges positives dans l'oxyde à l'aide du simulateur Atlas à travers l'étude de trois types d'isolation entre les pixels afin de palier au court-circuit entre les pixels. Ces types d'isolation sont appelés p-stop, p-spray et p-moderate. Pour chaque structure nous avons évalué les performances électriques du détecteur à travers le courant de fuite et la tension de claquage. Nous avons constaté que le courant de fuite circulant dans le détecteur est indépendant du type d'isolation introduit dans ce dernier. Par contre, la tension de claquage elle est influencée par le type d'isolation entre les pixels. Nous avons remarqué que la valeur du dopage est très critique si on veut s'affranchir de la couche d'électrons formée en dessous de l'interface Si/SiO₂ ce qui nécessite une optimisation technologique.

La connaissance et la maîtrise des procédés technologiques en microélectroniques conduit évidemment à améliorer de plus en plus le comportement de ces structures et par conséquent à leur parfaite utilisation dans les applications dédiées.

- [1] <https://home.cern/fr>.
- [2] H. Mathieu, "Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques", 6ème édition, Dunod, Paris, 2009.
- [3] L. Rossi, P. Fisher, T. Rohe, and N. Wermes, "Pixel detectors: from fundamentals to applications", Springer-Verlag, 2006.
- [4] C. Piemonte, "Device simulations of isolation techniques for silicon microstrip detectors made on p-type substrates", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 53, No. 3, June 2006.
- [5] ATLAS User's manual", Silvaco International Inc, Device Simulation Software, December 2006.
- [6] R. Negru, «Conception et modélisation de pixels de photodétection », thèse PhD, Université de France, 2008.
- [7] O. Terghini, « Simulation numérique des effets des radiations dans les détecteurs de particules à base de silicium de type p », Université Mohamed Khider de Biskra, 2015.
- [8] K. Zeghdar, « Simulation des caractéristiques courant-tension à base d'une diode Schottky en Phosphure d'indium InP », Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider de Biskra, Juin 2014.