

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 DAHLEB Blida
كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie
قسم الإلكترونيك
Département D'Électronique



Mémoire de Projet de Fin D'Études

Présenté par :

BELALIA Ryma

BOUMESHED Imen

Pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique

Spécialité Micro- électronique

Étude de l'effet des deux techniques de terminaison sur un détecteur de particule a bord actif à l'aide des outils TCAD-SILVACO

Encadreur : Mr OUSSALAH. S

Co-encadreur : Mr AISSET. A

Année Universitaire : 2018 - 2019

Remerciements

Je remercie Dieu de m'avoir donné le courage, la patience et la santé pour réaliser ce travail

Tout d'abord, je tiens à remercier très sincèrement les membres du jury de m'avoir fait l'honneur de juger ce travail.

Je tiens à remercier vivement mon promoteur Monsieur Slimane OUSSLAH, chercheur au sein de la division microélectronique et nanotechnologie du Centre de Développement des Technologies Avancées qui a dirigé ce travail. Je lui exprime ma sincère reconnaissance pour toute l'aide qu'il m'a apporté, sa disponibilité et ses précieux conseils..

Je tiens ici à exprimer des remerciements particuliers à Monsieur Said NACER d'avoir accepter de co-encadrer ce projet d'étude, pour sa grande disponibilité, pour son écoute et ses encouragements.

Je souhaite exprimer mes remerciements respectueux aux enseignants du département d'électronique de l'université SAAD DAHLEB de Blida qui nous ont beaucoup appris.

Merci enfin à toutes les personnes qui ont contribué de différentes façons à la réalisation de ce travail.

*« La science est d'un goût amer à ses débuts,
mais à la fin elle est aussi douce que le miel »*

Inscription sur un plat,

Nishapur (Iran) Xème siècle

Dédicaces

A mes parents pour leur soutien permanent, constant et surtout sans aucune faille ;

avec la patience et la confiance qui ont toujours placée en moi :

vous m'avez permis d'avancer en toute quiétude;

A ma sœur Salma, mes frères Oussama et Abdourahmen;

A ma famille ; mes chères cousines particulièrement Khadidja BOUDAH ; Soumeya et Nesserine.

A mes amies de master de la promotion 2019

Mr Ali Bey MAHARI ; M^{me} Nassima ALILI; M^{me} Ryma BELLALIA

A tous ceux que j'ai croisé sur mon chemin et qui ont contribué à rendre possible mon parcours



المخلص

حاليا تدرس أنواع مختلفة من أجهزة الكشف ذات أشباه الموصلات للتطبيقات المخصصة لفيزياء الطاقات العالية مثل تلك التي تدخل في إطار تجربة ATLAS DU CERN في جونييف.

في عملنا هذا كان الاختيار متعلقا بكاشف الجسيمات له شبه موصل مع حافة التنشيط. حيث اننا قمنا بدراسة الأداء الكهربائي لهذا الكاشف عن طريق تحليل معلومات هندسية وتكنولوجية معينة كتدفق المعدن على البكسل ووجود حلقة من الواقي في البنية.

نتائج هذه الدراسة تقيم بواسطة ATLAS المحاكى من برنامج SILVACO .

Résumé

Pour des applications dédiées à la physique des hautes énergies comme celles qui entrent dans le cadre de l'expérience ATLAS du CERN à Genève, différents types de détecteurs à semi-conducteurs sont actuellement étudiés. Dans ce travail, le choix a été porté sur un détecteur de particules à semi-conducteur avec un bord active. Les performances électriques de ce détecteur seront étudiées en analysant certains paramètres géométriques et technologiques, comme le débordement du métal sur le pixel (Field plate) et la présence d'un anneau de garde dans la structure. Les résultats de cette étude seront présentés à l'aide du simulateur Atlas du logiciel SILVACO.

Abstract

For applications dedicated to high-energy physics such as those included in CERN's ATLAS experiment in Geneva, different types of semiconductor detectors are being studied. In this work, the choice was made for a semiconductor particle detector with an active edge. The electrical performance of this detector will be studied by analyzing certain geometric and technological parameters, such as the overflow of metal on the pixel and the presence of a guard ring in the structure. The results of this study will be presented using the Atlas simulator of the SILVACO software.

Listes des acronymes et abréviations

CERN : Conseil européen pour la recherche nucléaire.

LHC : Large Hadron Collider.

LHCb : Large Hadron Collider beauty experiment.

PS : Synchrotron à protons

SPS : Super synchrotron à protons

CMS : Compact Muon solenoid.

P : Dopage de type accepteur (densité des trous) (cm^{-3}).

n : Dopage de type donneur (densité des électrons) (cm^{-3}).

n_i : Densité de porteurs libres intrinsèques (cm^{-3}).

T : Température (K).

E_G : Energie du gap.

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

E_F : Energie du niveau de Fermi.

E_c : Energie de la bande de conduction.

E_v : Energie de la bande de valence.

E_i : Energie intrinsèque.

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

i : Courant électrique (A).

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}).

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

J_n : Densité du courant des électrons.

J_p : Densité du courant des trous.

G_n ; G_p : Taux de génération optique des paires électrons trous.

R_n ; R_p : Taux de recombinaisons pour les électrons et les trous.

ϵ_0, ϵ_r : Permittivité et permittivité relative.

D_n : Coefficient de diffusion des électrons.
 D_p : Coefficient de diffusion des trous.
 μ_n : Mobilité des électrons ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$).
 μ_p : Mobilité des trous ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{S}^{-1}$).
 V_n : Potentiel (n).
 V_p : Potentiel (p).
 $\sigma_{(n,p)}$: Conductivité du matériau pour les électrons et les trous.
 q : Charge électrique élémentaire (1.6×10^{-19}).
ZCE : Zone de déplétion, ou la zone désertée.
DDP : Différence de potentiel.
W : Largeur de la zone de déplétion.
 Φ : Barrière de potentiel.
 U_T : Tension thermodynamique.
 $\vec{F}$: Force électrique.
 $\vec{E}$: Champ électrique (v.c^{-1}).
CCE : Collection de la charge d'espace.
JTE : Junction Termination Extension.
SIPOS : Semi Insulating Polycrystalline Silicon.
BV : Bande de valence.
V : Tensions appliquées à la structure.
 ΔI : Différence des courants (A).
TCAD : Technology Computer Aided Design.
 D_C : Courant directe.
 A_C : Courant alternative.
Gap : Distance entre le bord actif et le pixel
 F_P : Field plate
 G_R : Guard Ring

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

DEDICACE

RESUME

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS

Introduction générale.....	01
Chapitre 01 Généralités sur les détecteurs à base de semi-conducteurs.....	03
1.1 Introduction	03
1.2 Présentation de l'expérience ATLAS.....	03
1.2.1 LE CERN.....	03
1.2.2 LHC	04
1.2.3 ATLAS	05
1.3 Interaction rayonnement-matière.....	06
1.4 Les semi-conducteurs	07
1.4.1 Définition d'un semi-conducteur	07
1.4.2 Bande d'énergie.....	07
1.4.3 Semi-conducteur intrinsèque	08
1.4.4 Semi-conducteur extrinsèque.....	09
a. Dopage Type N.....	10
b. Dopage Type P	10
1.5 Les équations fondamentales des semi-conducteurs	11
a. Equation de continuité	11
b. Equation de poisson	12
c. Equation de transport.....	12
1.6 La jonction P-N.....	14
1.6.1 Définition.....	14
1.6.2 La jonction pn polarisé en direct.....	14
1.6.3 La jonction pn polarisé en inverse.....	15
a. Zone de charge d'espace	16

b. Claquage de la jonction.....	17
1.7 Détecteur a semi-conducteur	19
1.7.1 Définition.....	19
1.7.2 Détecteur des particules a base de semi-conducteur.....	19
1.7.3 Détecteur des particules au silicium	20
1.7.4 Principe de fonctionnement.....	20
1.7.5 Les différents types de détecteur	22
a. Microstrip	22
b. Planaire (2D).....	22
c. 3D	23
1.8 Détecteur de particule a semi-conducteur avec un bord active.....	24
1.9 Les techniques de garde des composants planar haute tension.....	25
1.9.1 Les anneaux flottants	25
a. Anneau de garde diffusé	25
b. Anneau de garde diviseurs de champ	26
1.9.2 Les parametres influançants la tenue en tensien.....	26
1.9.3 Les avantages et les inconvenients de cette technique	27
1.9.4 Les plaques de champs.....	27
➤ Les parametres influençants la tenue en tension.....	28
➤ Les avantages et les inconvenients de cette sructure	28
1.10 Effet de radiation sur les détecteurs	29
1.10.1 Effet surfacique	29
1.10.2 Effet volumique	30
1.10.3 Les pièges	30
1.11 Courant de fuite	31
1.12 Conclusion	32
Chapitre 02 Outils de simulation TCAD_SILVACO.....	33
2.1 Introduction	33
2. 2 Le rôle de la stimulation.....	33
2.3 SILVACO-TCAD	34
2.4 Présentation de l'ogiciel de stimulation «SILVACO-TCAD»	34
2.4.1 ATHENA.....	35
2.4.2 ATLAS	35
2.4.3 Deckbuild	36

2.4.4	Devidit	37
2.5	Ordre des commandes.....	37
2.5.1	Spécification de la structure	37
a.	Maillage	37
b.	Région	39
c.	Electrode.	39
d.	Dopage	40
2.5.2	Spécification des modeles des matériaux	40
a.	Matériaux	40
b.	Modèles.....	40
c.	Contact	41
d.	Interface	41
2.5.3	Spécification des méthodes numériques de calcul.....	41
2.5.4	Spécification de solution	41
a.	Log	42
b.	Slove.....	42
c.	Load	42
d.	Save.....	42
2. 6	Analyse des résultats	43
a.	TONYPLOT	42
b.	EXTRACT	42
2.7	Conclusion.....	42
Chapitre 03 Résultats de simulation.....		43
3.1.	Introduction.....	43
3.2.	Structure sans terminaisons.....	43
3.2.1.	Description de la structure.....	43
3.2.2.	La structure ATLAS.....	44
3.2.3.	L'influence de l'épaisseur d'oxyde.....	45
3.2.4.	L'influence de la charge dans l'oxyde.....	45
3.2.5.	Le champ électrique.....	47
3.3.	Structure avec anneau de garde.....	48
3.3.1.	Choix de l'épaisseur de l'oxyde.....	49
3.3.2.	Le positionnement de l'anneau de garde.....	49
3.3.3.	Gap 20.....	50

3.3.4. Gap 30.....	52
3.4. Structure avec plaque de champ.....	53
3.4.1. La largeur de la plaque de champ.....	54
3.4.2. L'épaisseur d'oxyde.....	55
3.4.3. Gap 10.....	55
3.4.4. Gap 20.....	57
3.4.5. Gap 30.....	59
3.5. Étude comparative.....	62
3.5.1. Comparaison entre les trois Gap.....	62
3.5.2. Comparaison entre la structure avec anneau de garde et celle avec plaque de champ.....	63
3.6 Conclusion.....	64
Conclusion générale.....	65
Références Bibliographies.....	66

Listes des figures

Figure 1.1 Schéma du complexe d'accélération du CERN .La chaine d'injection du LHC est constituée du Linac2, du Booster, du PS et du SPS.	4
Figure 1.2 Vue schématique du LHC.	5
Figure 1.3 Le détecteur ATLAS.	6
Figure 1.4 Classification des rayonnements.	7
Figure 1.5 Bandes d'énergies pour les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs.	8
Figure 1.6 Représentation schématique des liaisons électroniques pour un semi-conducteur intrinsèque (Si)	9
Figure 1.7 Les différentes situation d'un sem-conducteur: (a) intrinsèque, (b) de type n, et (c) de type p.	9
Figure 1.8 Silicium dopé au phosphore.	10
Figure 1.9 Silicium dopé au Bore.	11
Figure 1.10 La jonction P-N.	14
Figure 1.11 Représentation de la polarisation directe.	15
Figure 1.12 Représentation de la polarisation inverse.	15
Figure 1.13 La jonction pn à l'équilibre thermodynamique.	16
Figure 1.14 Caractéristique courant-tension en polarisation directe et en polarisation inverse.	18
Figure 1.15 Principe de la détection dans un détecteur à semi-conducteur.	21
Figure 1.16 Schéma d'un détecteur Microstrip.	22
Figure 1.17 Schéma d'un détecteur planaire.	23
Figure 1.18 Schéma d'un détecteur 3D.	24
Figure 1.19 Schéma d'un détecteur 3D en réalité.	24
Figure 1.20 Coupe schématique d'une jonction pn équipée d'un anneau de garde diffusé.	26
Figure 1.21 Coupe schématique d'une jonction pn équipée d'anneaux de garde diviseurs de champ.	26
Figure 1.22 Coupe schématique d'une jonction pn équipée d'une plaque de champ.	28
Figure 1.23 Représentation schématique des effets de surface dans un dioxyde de silicium subissant une interaction ionisante.	29
Figure 1.24 Schéma de principe de processus de génération et de recombinaison avec un niveau intermédiaire apporté par un piège pour un électron (1) ou un trou (2). Les taux de transition sont repérés entre les niveaux du piège t, et les bandes de conduction c et de valence v.	31
Figure 1.25 Courant de fuite en jonction de la fluence pour différents type de détecteur.	32

Figure 2.1 Le rôle de la simulation.....	33
Figure 2.2 Les entrées et les sorties d'ATLAS.....	36
Figure 2.3 Programme de simulation défini dans l'environnement Deckbuild.....	37
Figure 2.4 Définition du maillage avec ATLAS.....	39
Figure 2.5 Définition des électrodes avec Atlas.....	40
Figure 3.1 Représentation schématique de la structure.....	43
Figure 3.2 Représentation schématique de la structure sous ATLAS. a) matériaux, b) maillage et c) dopage.....	44
Figure 3.3 Variation de la tension de claquage en fonction de L'épaisseur d'oxyde pour les trois Gap.....	45
Figure 3.4 Caractéristiques courant-tension d'une structure sans terminaison, sans et avec charge dans l'oxyde.....	46
Figure 3.5 Variation de la tension de claquage en fonction de la charge d'oxyde pour les trois valeurs de Gap.....	46
Figure 3.6 Représentation du champ électrique dans la structure sans charge dans l'oxyde.....	47
Figure 3.7 Représentation du champ électrique dans la structure avec charge dans l'oxyde.....	48
Figure 3.8 Structure avec anneau de grade.....	49
Figure 3.9 Disposition de l'anneau de garde par rapport au pixel.....	50
Figure 3.10 Caractéristiques courant-tension pour un détecteur avec différentes positions de l'anneau de garde.....	51
Figure 3.11 La tension de claquage en fonction du positionnement de l'anneau de garde.....	51
Figure 3.12 Caractéristiques courant-tension pour un détecteur avec différentes positions de l'anneau de garde.....	52
Figure 3.13 La tension de claquage en fonction du positionnement de l'anneau de garde.....	53
Figure 3.14 Structure avec plaque de champ.....	54
Figure 3.16 Caractéristiques courant-tension pour un détecteur avec différentes longueurs de plaques de champ.....	55
Figure 3.17 Changements de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ.....	56
Figure 3.18 Variation de la tension de claquage en fonction de la longueur de la plaque de champ pour différentes valeurs d'épaisseur d'oxyde.....	56
Figure 3.19 Variation de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ pour différentes valeurs de charge dans l'oxyde.....	57

Figure 3.20 Caractéristiques courant-tension pour un détecteur avec différentes largeurs de plaques de champ.....	58
Figure 3.21 Changement de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ.....	58
Figure 3.22 La Variation de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ pour différentes valeurs d'épaisseur d'oxyde.....	59
Figure 3.23 Caractéristiques courant-tension pour un détecteur avec différentes longueurs de plaques de champ.....	60
Figure 3.24 Variation de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ.....	60
Figure 3.25 Variation de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ pour différentes valeurs d'épaisseur d'oxyde.....	61
Figure 3.26 La variation de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ pour différentes valeurs de charge dans l'oxyde.....	62
Figure 3.27 Comparaison de la tension de claquage en fonction de la largeur des trois gaps pour une Structure sans terminaison.....	62
Figure 3.28 (a) La comparaison de la tension de claquage pour les deux techniques de garde (plaque de champ et l'ajout de l'anneau de garde).....	63
Figure 3.28 (b) la comparaison des valeurs de courant de fuite entre les deux techniques de garde (plaque de champ et l'anneau de garde).....	64

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.

Les semi-conducteurs les plus étudiés et les plus utilisés sont le silicium (Si) et l'arséniure de gallium (GaAs) mais le silicium est le matériau préféré pour les détecteurs trajectographies construites actuellement pour les expériences avec le grand collisionneur d'hadrons (LHC) du CERN.

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 deux techniques de terminaison « les plaques de champs et l'emplacement d'un anneau flottant » sur un détecteur de particule à bord actif 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 techniques de garde des composants planar haute tension. 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.

Le dernier chapitre consacré à la présentation des étapes de simulation ainsi que les résultats obtenus pour les différents cas de positionnement d'un anneau de garde et l'ajout des plaques de champs et les performances électrique extraites pour chaque cas. Enfin, nous terminons par une conclusion. Enfin, nous terminons par une conclusion.

Chapitre 01 Généralités sur les détecteurs à base de semi-conducteurs

1.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire « CERN », le Grand Collisionneur de Hadrons (Large Hadron Collider « LHC ») et l'expérience ATLAS.

Après un rappel succinct sur les notions de base des semi-conducteurs ainsi que les équations fondamentales qui les régissent 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 dans le cadre de la physique des hautes énergies. De ce fait, on va la décrire à travers son mode de fonctionnement.

Ensuite on va présenter les détecteurs de particules à bord actif qui vont être l'objet de notre travail de simulation.

1.2 Présentation de l'expérience ATLAS

1.2.1 LE 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 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].

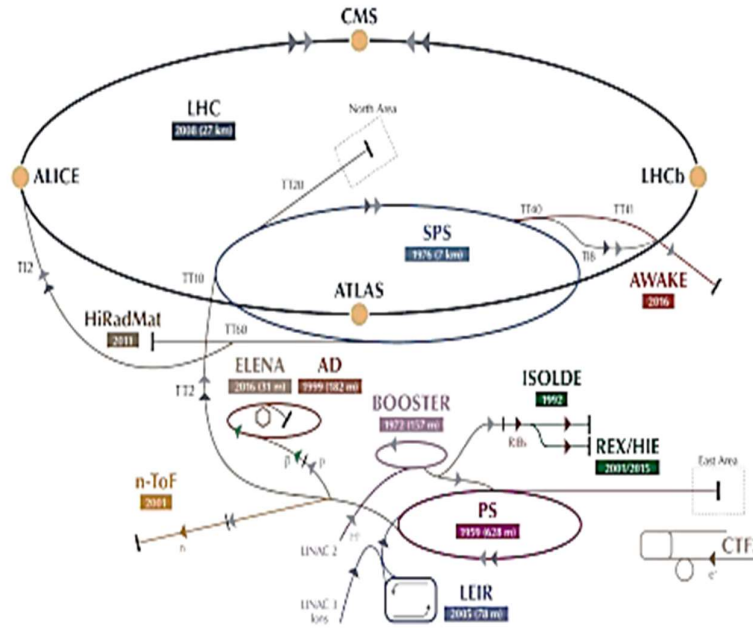


Figure 1.1 Schéma du complexe d'accélération du CERN. La chaîne d'injection du LHC est constituée du Linac2, du Booster, du PS et du SPS [2].

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 de diamètre 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 de paquets contenant chacun des centaines de milliards de protons. 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, 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 détecteurs scrutent déjà les données pour y déceler les signes d'événements extrêmement rares, tels que la création du très recherché boson de Higgs. [3]

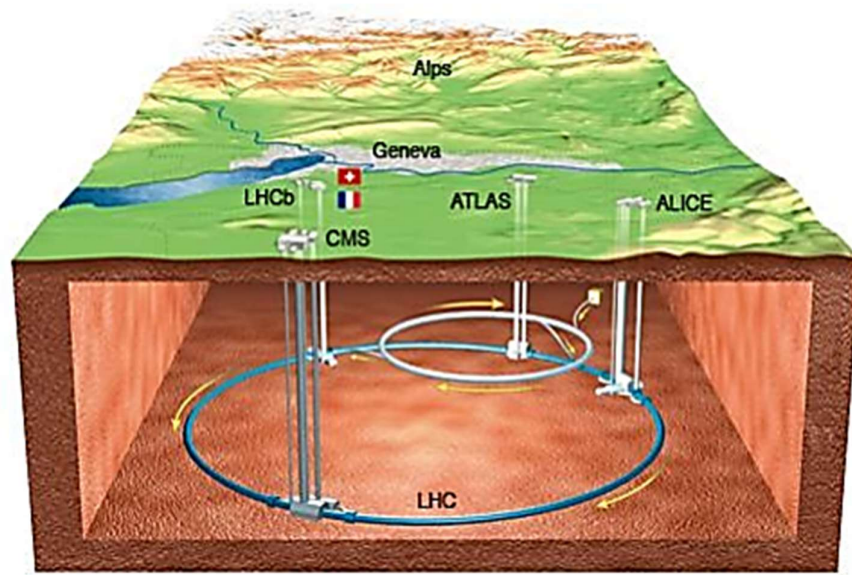


Figure 1.2 Vue schématique du LHC [2].

1.2.3 ATLAS

Est l'un des deux détecteurs polyvalents du Grand collisionneur d'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 longueur, 25 m de hauteur et 25 m de largeur, 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) [3].

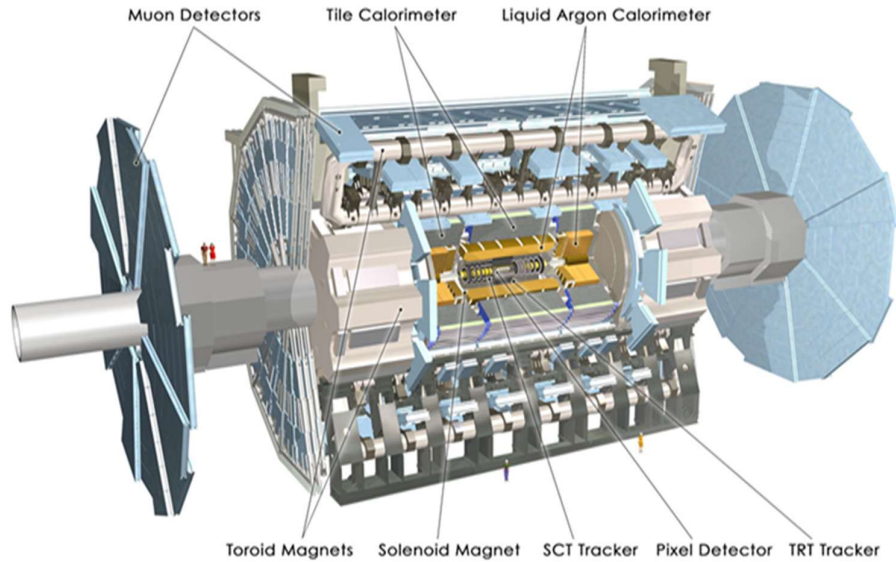


Figure 1.3 Le détecteur ATLAS [1].

1.3 Interaction rayonnement-matière

L'étude de l'interaction rayonnement-matière a été en grande partie effectuée au vingtième siècle et trouve son origine dans la découverte de la radioactivité par Henri Becquerel en 1896. Cette découverte a permis des avancées considérables, tant d'un point de vue fondamental que technologique. L'avènement du nucléaire civil à la fin des années 50 a stimulé la recherche des effets des rayonnements sur différents types de matériaux (alliages métalliques, semi-conducteurs, matériaux organiques).

Un rayonnement est défini comme un mode de propagation de l'énergie dans l'espace, vide ou matériel, donc On peut classifier les rayonnements selon leur nature propre (voir la figure 4), indépendamment de la matière dans laquelle ils se propagent et cèdent de l'énergie en deux catégories :

- Rayonnements directement ionisants : ils sont constitués de particules chargées qui délivrent directement à la matière leur énergie, par le jeu des forces coulombiennes s'exerçant entre elles et les atomes du milieu. Les transferts d'énergie dépendent des masses des particules en mouvement et il y a lieu de distinguer entre particules chargées lourdes (proton, deuton, alpha, ions lourds) et électrons.
- Rayonnements indirectement ionisants : ils sont électriquement neutres et sont susceptibles de transférer une importante fraction ou la totalité de leur énergie en une seule interaction à des particules chargées. Ce sont ensuite ces particules secondaires qui ionisent le milieu. L'ionisation, dans ce cas, se fait donc en deux étapes. Les

rayonnements électromagnétiques (X et Gamma) et les neutrons entrent dans cette catégorie, mais leur mode d'interaction sont différents [4].

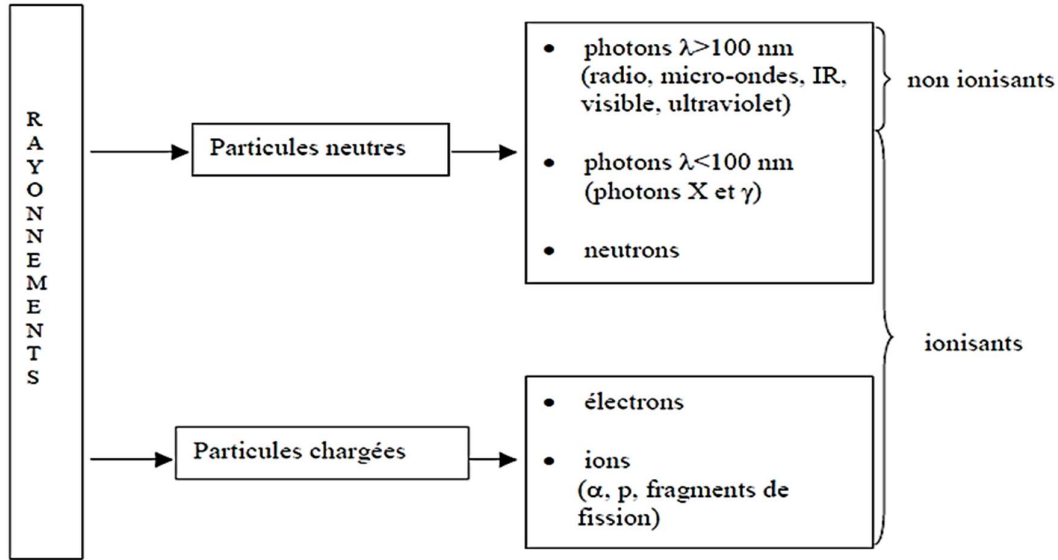


Figure 1.4 Classification des rayonnements [4].

1.4 Les semi-conducteurs

1.4.1 Définition d'un semi-conducteur

Les matériaux solides peuvent être classés en trois groupes qui sont : les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs. On considère comme isolants, les matériaux de résistivité supérieure à $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, comme semi-conducteur les matériaux avec une résistivité comprise entre $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ et $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$, et comme conducteurs les matériaux avec une résistivité inférieure à $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$.

La Figure 5 présente les bandes d'énergie pour ces trois groupes de matériaux. Les deux bandes d'énergie sont éloignées et aucun courant ne peut circuler dans le cas des isolants, contrairement aux conducteurs dont les deux bandes d'énergie se recouvrent partiellement. Pour les semi-conducteurs, la conduction électrique s'effectue par la création de paires électron-trou. Les trous résultant du passage d'électrons de la bande de valence vers la bande de conduction qui sont séparées par un faible intervalle d'énergie [5].

1.4.2 Bande d'énergie

Dans un corps solide, deux bandes sont particulièrement importantes pour la compréhension des phénomènes de conduction : la bande de conduction et la bande de valence. La bande de

conduction représente les énergies des électrons libres. Dans la bande de valence se situent les électrons liés avec le réseau cristallin.

Les bandes sont séparées par une zone énergétique interdite : c'est la plage des énergies que les électrons ne peuvent pas posséder. Cette zone, aussi que sa largeur, s'appelle gap énergétique. C'est un paramètre propre du matériau (on parle d'un gap du matériau). Ainsi, les électrons peuvent passer directement de la bande de valence vers la bande de conduction pour cela il faut qu'ils acquièrent une énergie égale au moins à la largeur du gap. Il y a différents mécanismes par lesquels les électrons peuvent recevoir de l'énergie. Celui le plus courant est un échauffement : plus la température d'un corps est élevée, plus d'énergie possèdent les électrons, plus ils ont de chances de franchir le gap [6].

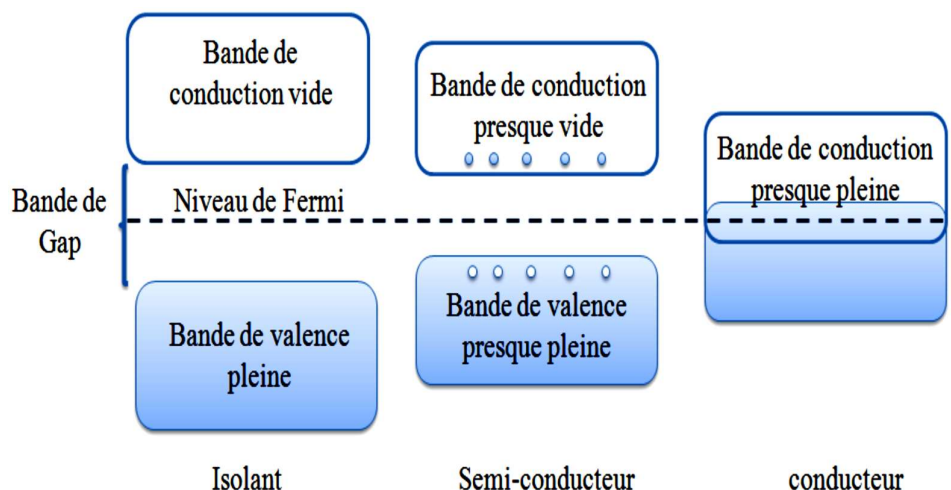


Figure 1.5 Bandes d'énergies pour les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs [5].

1.4.3 Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur est dit intrinsèque lorsque le cristal n'est pas pollué (volontairement ou non) par des impuretés pouvant changer la concentration en porteurs libres. Pour une température différente de 0 K, des électrons peuvent devenir "libres" c'est à dire passer de la bande de valence à la bande de conduction, ou leur concentration est notée n . Ces électrons laissent des trous dans la bande de valence (avec une concentration notée p) eux-aussi libres de se déplacer avec, de plus, une égalité entre les concentrations n et p . Pour ce cas particulier, on définit une concentration intrinsèque n_i (égale aux concentrations n et p) [7] [8].

$$n = p = n_i(T) = AT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G}{2kT}\right) \quad (1.1)$$

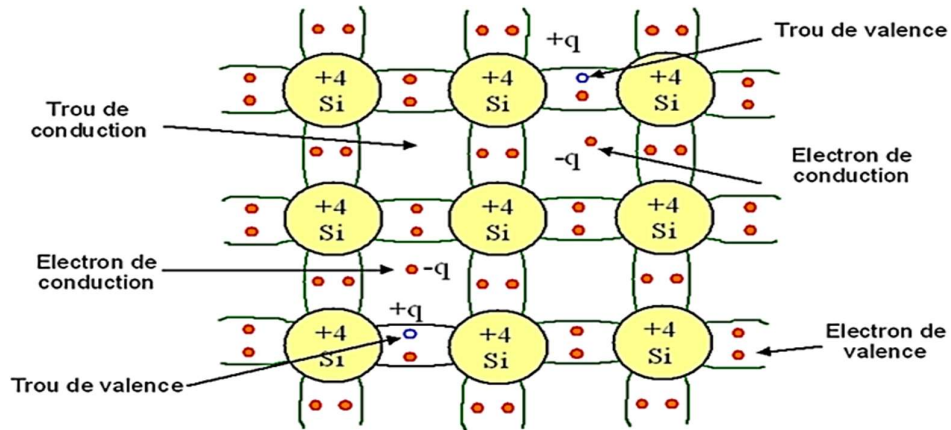


Figure 1.6 Représentation schématique des liaisons électroniques pour un semi-conducteur intrinsèque (Si) [9].

1.4.4 Semi-conducteur extrinsèque :

Un semi-conducteur est extrinsèque quand on lui injecte des atomes étrangers spécifique de manière contrôlée, on appelle cette opération "le dopage", ce dernier nous permis de modifier les propriétés électriques d'un semi-conducteur. Il existe deux types de dopage (dopage N et dopage P), voir la figure (1.7) [7].

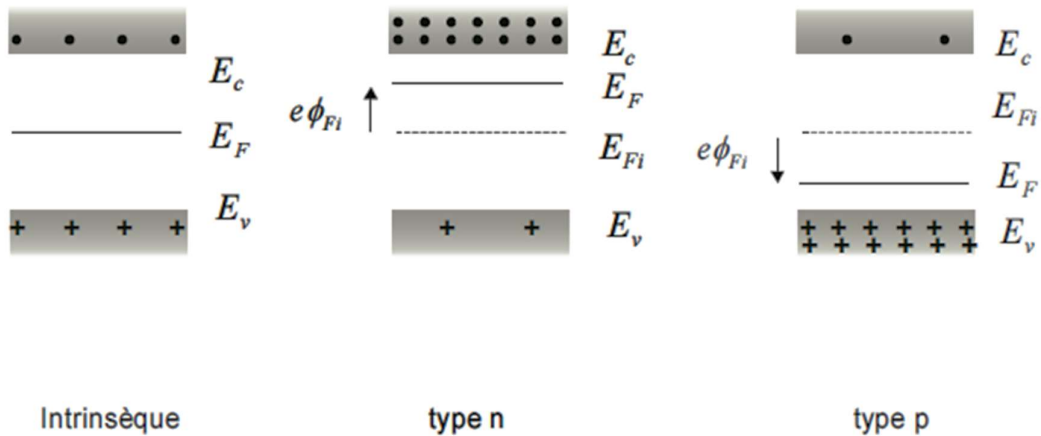


Figure 1.7 Les différentes situations d'un semi-conducteur: (a) intrinsèque, (b) de type N, et (c) de type P [7].

a. Dopage type N

Le dopage de type N consiste à augmenter la densité en électrons dans le semi-conducteur. Pour le réaliser, on intègre un certain nombre d'atomes riches en électrons dans le semi-conducteur. Par exemple dans le cas de silicium, les atomes de silicium 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 intègre un atome ayant cinq électrons de valence, comme ceux de la colonne V 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 sont des porteurs minoritaires.

Et lorsque les atomes à cinq électrons ont un électron supplémentaire à donner, ils sont appelés atomes donneurs. La figure (1.9) montre le silicium dopé au phosphore qui possède cinq électrons sur la couche externe [7] [10].

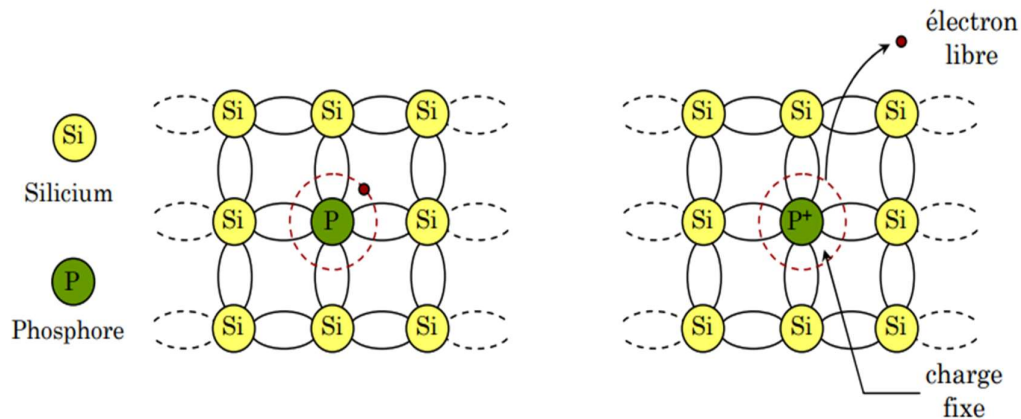


Figure 1.8 Silicium dopé au phosphore [5].

$$E_F = E_C - k_B T \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (1.2)$$

b. Dopage type P

Un semi-conducteur de type P est un semi-conducteur intrinsèque, dans lequel on introduit des impuretés, qui possèdent trois électrons sur leur couche externe (Bore, Indium). Ces impuretés sont appelées des accepteurs parce qu'elles acceptent un électron de la bande de

conduction afin de réaliser une liaison avec le cristal semi-conducteur. La Figure (1.9) présente schématiquement des liaisons électroniques pour le semi-conducteur silicium dopé P par du Bore.

L'atome dopant a perdu sa neutralité et est devenu alors un ion fixe négatif par capture d'un électron. Ce phénomène correspond à l'apparition d'un niveau d'énergie E_F dans la bande de gap, au-dessus de la bande de valence. La quasi-totalité des atomes accepteurs est ionisée à la température ambiante (Figure 1.9 (Type p)). Si N_A correspond à la concentration des atomes accepteurs, donc on obtient $p = N_A$ trous libres. Dans un semi-conducteur de type P, les trous sont les majoritaires, les électrons sont les minoritaires, et la conduction est assurée par les trous [5] [10].

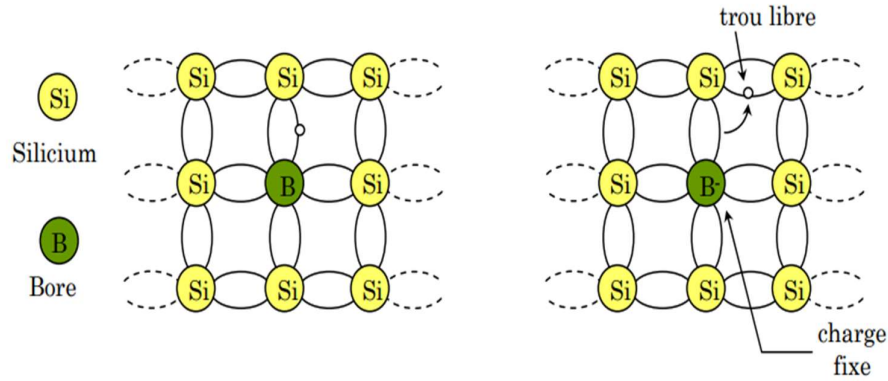


Figure 1.9 Silicium dopé au Bore [5].

$$E_F = E_V + k_B T \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) \quad (1.3)$$

1.5 Les équations fondamentales des semi-conducteurs

a. Equation de continuité

Les équations de continuité permettant de déterminer, en tout point et à chaque instant, la concentration des porteurs dans un semi-conducteur, elle s'écrit [7] :

$$\frac{1}{e} \text{div}(\vec{J}_p) = -\frac{\partial p}{\partial t} + G_p - R_p \quad (1.4)$$

$$-\frac{1}{e} \text{div}(\vec{J}_n) = -\frac{\partial n}{\partial t} + G_n - R_n \quad (1.5)$$

G_n et G_p sont les taux de génération optique des paires électrons trous, R_n et R_p sont respectivement les taux de recombinaisons pour les électrons et les trous, $\vec{J}_p$ et $\vec{J}_n$ sont les densités des courants des électrons et des trous, p est la concentration en trous, n est la concentration en électrons, e est 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 [7].

b. Equation de Poisson :

L'équation de Poisson relie les variations du potentiel électrostatique (champs électrique) aux densités locales de charge. Elle s'exprime par [7] :

$$\frac{-d^2\varphi}{dx^2} = \frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad (1.6)$$

Où ρ est la charge électrique totale dans le semi-conducteur, $\varepsilon, \varepsilon_0$ sont la permittivité dans le vide et relative dans le matériau respectivement, φ est le potentiel électrostatique, n et p les concentrations des porteurs libres et E est le champ électrique.

La charge électrique totale ρ est déterminée par l'équation suivante [7] :

$$\rho = q(p - n + N_D^+ - N_A^-) \quad (1.7)$$

Où N_D^+ et N_A^- sont les densités des donneurs et accepteurs ionisés [7].

c. Equation de transport

L'équilibre thermodynamique est caractérisé par l'existence d'un seul niveau de Fermi dans tout le matériau et par la nullité du courant macroscopique $\vec{J}=0$. Différentes forces extérieures peuvent venir perturber cet équilibre (un champ électrique, un gradient de température, injection de porteurs en excès). Ces perturbations entraînent de façon permanente ou transitoire des mouvements collectifs des charges, cela est appelé courant électrique. Ce courant est composé de mouvement général des électrons, ainsi que des trous dont l'interprétation n'est pas intuitive.

Ces mouvements peuvent être mis en équation d'une manière très précise grâce à la mécanique quantique. La perturbation provoque une redistribution hors équilibre des porteurs sur les niveaux d'énergie. Cette partie ne traite que des courants de dérive et de diffusion [10].

➤ **Courant de diffusion :**

La répartition des porteurs de charge dans le volume est inhomogène. Son gradient induit un déplacement collectif des porteurs connu sous le nom de courant de diffusion. Ce phénomène est décrit par les équations suivantes [10] :

$$\vec{j}_{n,diff} = +eD_n \vec{\nabla} n_0 \quad (1.8)$$

$$\vec{j}_{p,diff} = -eD_p \vec{\nabla} p_0 \quad (1.9)$$

Avec D_n et D_p sont les coefficients de diffusion (toujours positifs) pour les électrons et les trous exprimés en cm^2/s . Dans le cas d'un semi-conducteur non dégénéré, on peut exprimer ces coefficients en fonction de la mobilité des porteurs. Ces relations sont connues sous le nom de relations d'Einstein :

$$D_{n,p} = k_B T \frac{\mu_{n,p}}{e} \quad (1.10)$$

Le courant de diffusion total s'écrit comme la somme de ces deux composantes [10] :

$$\vec{j}_d = +e D_n \vec{\nabla} n_0 - e D_p \vec{\nabla} p_0 \quad (1.11)$$

➤ **Courant de conduction**

L'application d'un champ électrique $\vec{E}$ accélère les charges dans la direction du champ entre deux collisions, ce qui induit des vitesses moyennes de déplacement v_n et v_p pour les électrons et les trous. Le vecteur d'accélération suit les lignes du champ électrique dans le sens de $\vec{E}$ pour les trous et dans le sens opposé pour les électrons. La vitesse moyenne de déplacement des charges due au champ électrique est donnée par [10] :

$$\vec{v}_{n,p} = \mp \mu_{n,p} \vec{E} \quad (1.12)$$

Avec $\mu_{n,p}$ la mobilité des électrons n ou des trous p. La somme des déplacements élémentaires de chacune des particules donne lieu à une densité de courant macroscopique $\vec{j}$:

$$\vec{j} = (-en \vec{v}_n + ep \vec{v}_p) \vec{E} = (\sigma_n + \sigma_p) \vec{E} \quad (1.13)$$

Avec, $\sigma_{n,p}$ la conductivité du matériau pour les électrons et les trous [10].

1.6 La jonction P-N

1.6.1 Définition

Une jonction P-N est constituée par la juxtaposition de deux régions de types différents d'un même monocristal de semi-conducteur. La différence des densités de donneurs et d'accepteurs, $N_d - N_a$ passe d'une valeur négative dans la région de type P à une valeur positive dans la région de type n. La loi de variation de cette grandeur dépend essentiellement de la technique de fabrication. Différents modèles peuvent être utilisés pour étudier théoriquement les propriétés de la jonction, (jonction abrupte, linéaire...). Le modèle de la jonction abrupte donne des résultats en très bon accord avec le comportement de la jonction. C'est le modèle que nous allons développer. Nous verrons ensuite comment généraliser les résultats à une jonction à profil de dopage quelconque.

La jonction P-N est une structure de base dans les composants. Les composants étant formés de semi-conducteurs dopés de manière différente, les jonctions P-N ou N-P sont présentes aux interfaces. Il est donc indispensable de bien comprendre les phénomènes physiques qui s'y manifestent. La jonction P-N est également un composant en soit. La fonction de ce composant est de laisser passer le courant dans un seul sens. Elle permet donc de transformer un signal alternatif en un signal unipolaire. Cette fonction est largement utilisée dans les systèmes électroniques d'alimentation ou de détection radiofréquence [7].

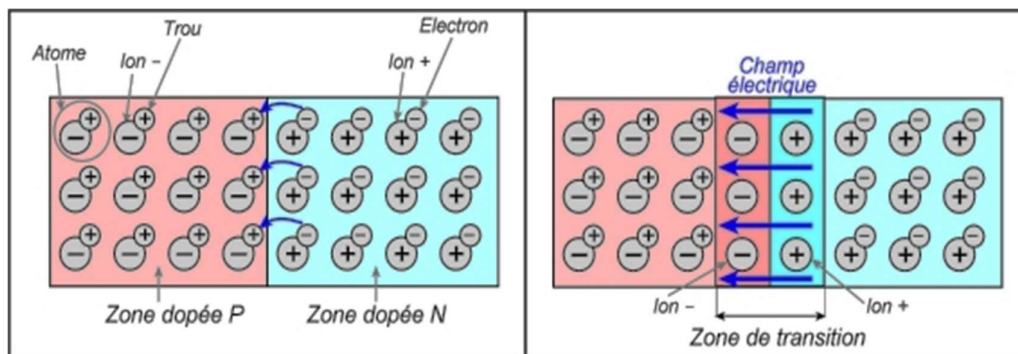


Figure 1.10 La jonction pn [3].

1.6.2 La jonction pn polarisé en direct

En polarisation directe, la borne négative doit être connectée à la région N. La borne positive est connectée à la région P, comme illustré dans la figure (1.11). Si la tension est plus grande que 0,7 V (pour le silicium), les électrons passent la jonction. Une fois dans la partie P, ils se

recombinent avec les trous et deviennent des électrons de valence. Comme ils sont attirés par la borne positive, ils se déplacent de trou en trou jusqu'à celle-ci. Les trous sont donc toujours disponibles pour les électrons suivants et sont donc toujours disponibles. Cette configuration est appelée « polarisation directe », car elle permet le passage du courant provenant de l'alimentation. Notez que la région d'appauvrissement est fortement amincie lors de la polarisation directe [11].

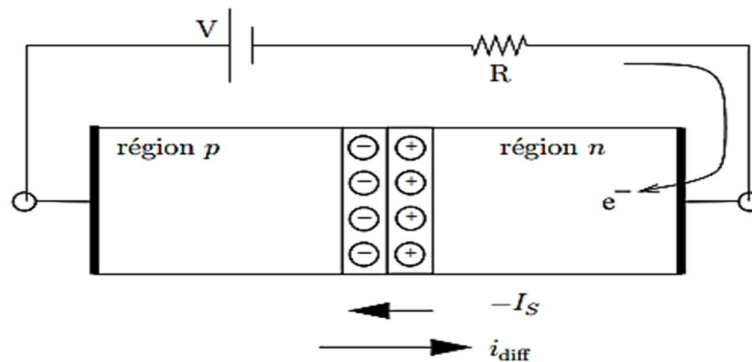


Figure 1.11 Représentation de la polarisation directe [3].

1.6.3 La jonction P-N polarisé en inverse

En polarisation inverse, la borne positive est connectée à la région N. La borne négative se trouve connectée à la région P. Les électrons libres sont alors attirés vers la borne positive. Les trous sont attirés vers la borne négative, comme le montre la figure (1.12).

Dans cette situation, le passage d'un courant est impossible. Toutefois, il subsiste un courant inverse extrêmement faible. Celui-ci provient des paires électron-trou générées par la chaleur. Ce courant est si infime qu'il est systématiquement négligé. Notez qu'en polarisation inverse, la région d'appauvrissement est considérablement élargie [11].

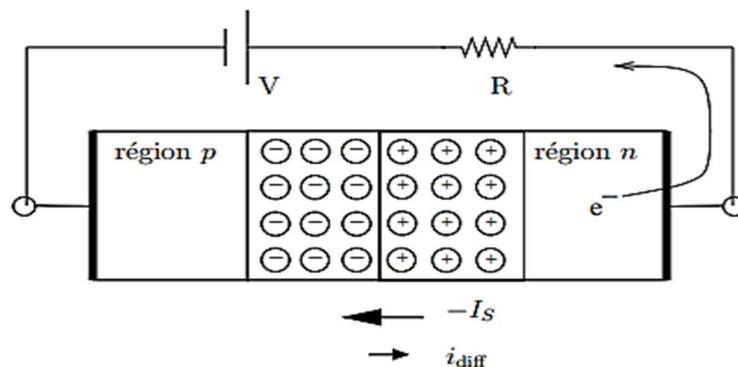


Figure 1.12 Représentation de la polarisation inverse [3].

a. Zone de charge d'espace

Il apparaît au niveau de la jonction P-N une zone dépourvue de charges libres contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique E interne dirigé de la région N vers la région P. Ce champ s'oppose à la diffusion des porteurs libres dans le but d'atteindre un équilibre électrique. Dans ces conditions, les répartitions du champ électrique, du potentiel électrostatique, et des charges sont résumés sur la Figure (1.13).

La zone dépourvue de porteurs libres est appelée zone de charge d'espace (ZCE) appelée aussi la zone de déplétion, ou la zone désertée. Elle s'étend sur une épaisseur de l'ordre de $0,5 \mu\text{m}$ à l'équilibre [5].

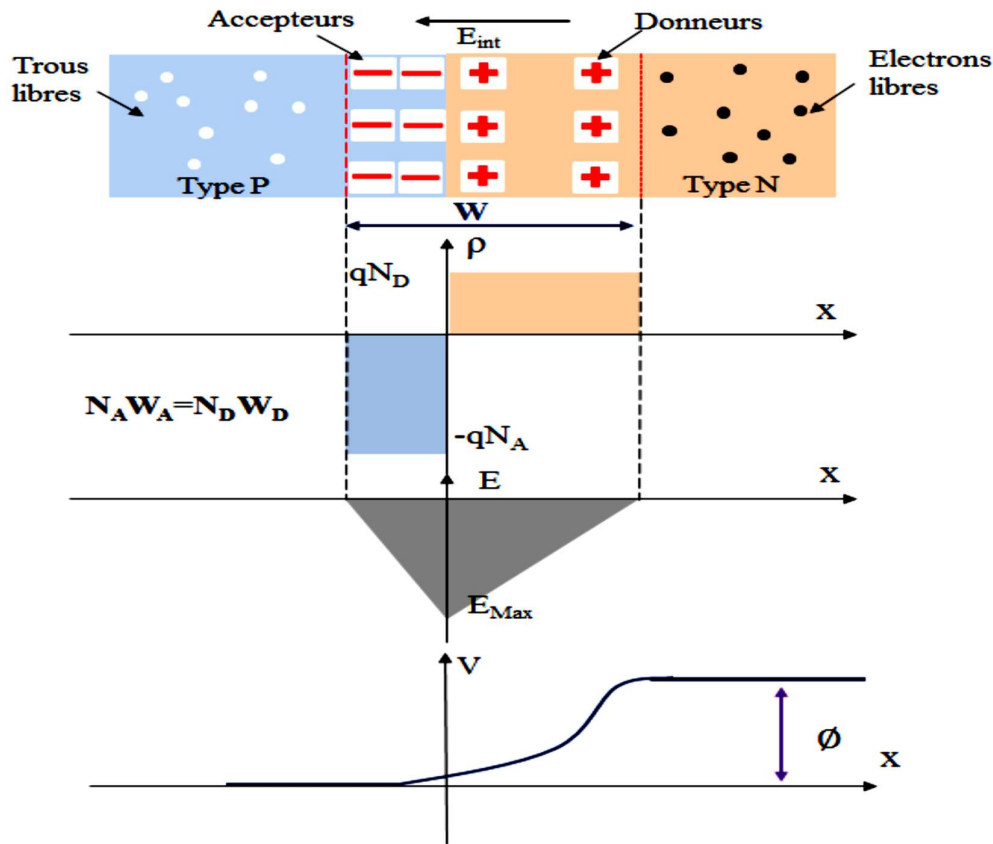


Figure 1.13 La jonction P-N à l'équilibre thermodynamique [5].

D'après la Figure (1.13) la forme du champ électrique peut être déduite par application des équations électrostatiques. En effet, $E(x)$ est un champ qui s'exprime en fonction de la densité de charge interne $\rho(x)$:

$$\frac{d E(x)}{dx} = \frac{1}{\varepsilon} \rho(x) \quad (1.14)$$

Où ε représente la permittivité du semi-conducteur.

Il apparaît donc une différence de potentiel (DDP) résultante du champ électrique entre les deux extrémités de la jonction, appelée potentiel de diffusion. L'expression de ce potentiel est donnée par l'équation suivante :

$$V(x) = \int -E(x)dx \quad (1.15)$$

La largeur de la zone de déplétion W est donnée par l'équation suivante :

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D} \phi} \quad (1.16)$$

Avec N_A et N_D représentant respectivement les concentrations des atomes accepteurs et des atomes donneurs. ϕ représente la barrière de potentiel qui constitue le potentiel de diffusion de la jonction, et s'écrit sous la forme suivante :

$$\phi = U_T \cdot \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right) \quad (1.17)$$

$$U_T = \frac{k \cdot T}{q} \quad (1.18)$$

Avec n_i est la concentration intrinsèque des porteurs libres, q est la valeur absolue de la charge de l'électron, et k est la constante de Boltzmann.

b. Claquage de la jonction

On atteint la tension de claquage de la jonction P-N, notée V_c si la polarisation est en inverse et le courant par conséquent augment brusquement comme le montre la figure (1.14) [12] :

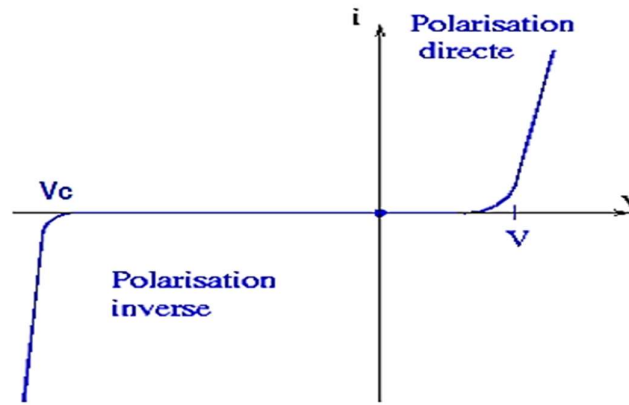


Figure 1.14 Caractéristique courant-tension en polarisation directe et en polarisation inverse [12].

Lorsque l'on augmente la tension de polarisation inverse, on augmente de ce fait le champ électrique à l'intérieur de la jonction. Or, il existe une valeur limite E_0 (pour le silicium $E_0=0.5\text{MV/cm}$) à ce champ électrique. En effet, lorsque le champ électrique augmente, la force électrique $\vec{F} = -q\vec{E}$ qui s'exerce sur les électrons liés au réseau cristallin s'accroît, et devient supérieure à la force de liaison des électrons de valence sur les noyaux. Ces électrons sont ainsi libérés, le cristal devient alors conducteur, et par conséquent le champ électrique n'augmente plus. Ceci signifie que le champ électrique maximum que l'on peut établir dans un cristal semi-conducteur est celui qui provoque l'excitation directe d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction, c'est à dire l'ionisation du matériau [12].

➤ Ionisation par impact

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

➤ Claquage par effet Zener (ou effet tunnel)

Les électrons associés aux paires électron-trou générés pendant l'augmentation brusque du champ électrique, sont émis de la bande de valence vers la bande de conduction à travers la zone de charge espace, d'où le nom effet tunnel. Cet effet est observable dans les jonctions fortement dopées et ayant une très petite zone de charge espace [5].

➤ Claquage par effet d'avalanche

Lorsque la largeur de la région de déplétion est supérieure à $0,1\ \mu\text{m}$, le phénomène de claquage de la jonction est obtenu par effet avalanche avant l'effet tunnel. Pour des champs électriques environ dix fois inférieure au seuil d'effet Zener, un apport de chaleur va créer des paires électrons-trous. L'énergie thermique acquise par ces électrons, est suffisante pour permettre de briser les liaisons de covalence entre les atomes au sein du réseau cristallin. Les électrons éjectés sont à leur tour accélérés par le champ électrostatique et heurtent d'autres atomes du cristal, résultant ainsi une nouvelle case vide d'électrons. Il en résulte un processus en chaîne appelée un phénomène d'avalanche [5].

1.7 Détecteur à semi-conducteur

1.7.1 Définition

La présence d'une petite bande interdite (comparativement aux isolants) permet d'utiliser les semi-conducteurs comme détecteur de radiation [14].

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) [03].

1.7.2 Détecteur des particules à base de semi-conducteur

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 [14].

Pendant l'irradiation, des défauts comme les interstitiels et les complexes de lacunes se manifestent. Ces défauts forment des niveaux énergétiques peu profonds et profonds dans le gap du semi-conducteur et donc affectent les caractéristiques électriques du détecteur. Leurs effets principaux sont [15] :

- Augmentation du courant de fuite (les défauts agissent comme centres de Recombinaison/génération).

- Réduction de l'efficacité de collection de la charge (lorsqu'ils jouent le rôle de pièges, la charge peut être réémise trop tard pour être collectée).
- Changement de la tension de déplétion (modification de N_{eff}) [14].

1.7.3 Détecteur des particules au silicium

Le silicium est le matériau de groupe IV. La durée de vie de porteurs minoritaires est longue (≈ 10 ms), puisqu'elle dépend de la densité des centres des pièges et du gap qui est indirect. La durée de vie est un paramètre important dans les détecteurs au silicium puisqu'elle détermine les caractéristiques de commutation. Lorsque le silicium est soumis à hautes radiations, son comportement devient semblable à celui de GaAs. En plus, le dopage de silicium par des métaux lourds (l'or, platine) donne le même effet [15].

Les détecteurs au silicium sont utilisés fréquemment dans les expériences de physique des particules qui exploitent entre autres leur résolution spatiale qui en fait d'excellents candidats pour les détecteurs de vertex.

Les détecteurs au silicium fonctionnent de manière optimale lorsque la zone désertée des porteurs de charge correspond à l'épaisseur physique totale du détecteur [16].

1.7.4 Principe de fonctionnement

Les détecteurs à semi-conducteurs fonctionnent en principe comme une chambre d'isolation solide, c'est-à-dire que les porteurs de charges positifs et négatifs sont créés dans les détecteurs par ionisations du matériau [17].

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 générées est proportionnel à la perte d'énergie, donc la détection de la quantité de charge donne une estimation de la perte 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 [18]. 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 (15). 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 régit par la sensibilité du détecteur à toute la charge déposée dans son volume [03].

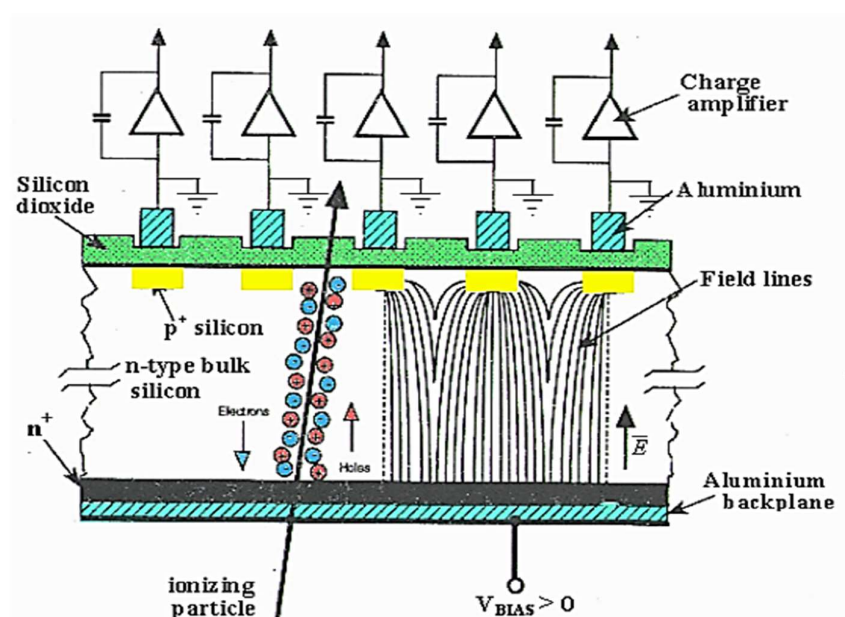


Figure 1.15 Principe de la détection dans un détecteur à semi-conducteur [03].

1.7.5 Les différents types de détecteur

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 du silicium séparé par un isolant SiO_2 est un design commun voir figure (1.16) [11].

**Silicon strip/microstrip detector
(SS, DC coupled)**

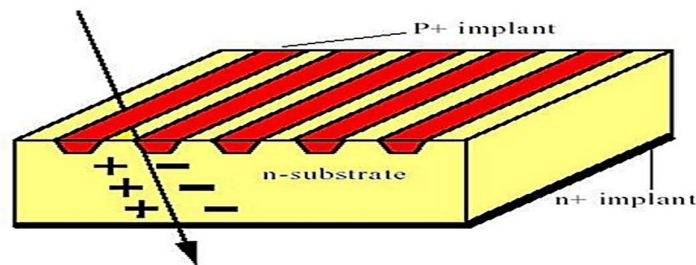


Figure 1.16 Schéma d'un détecteur Microstrip [11].

b. Planaire (2D)

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 SiO_2 , l'emploi d'anneaux de garde et la formation de la fenêtre d'entrée minces ont constitué les premiers essais d'adaptation de cette 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 [18].

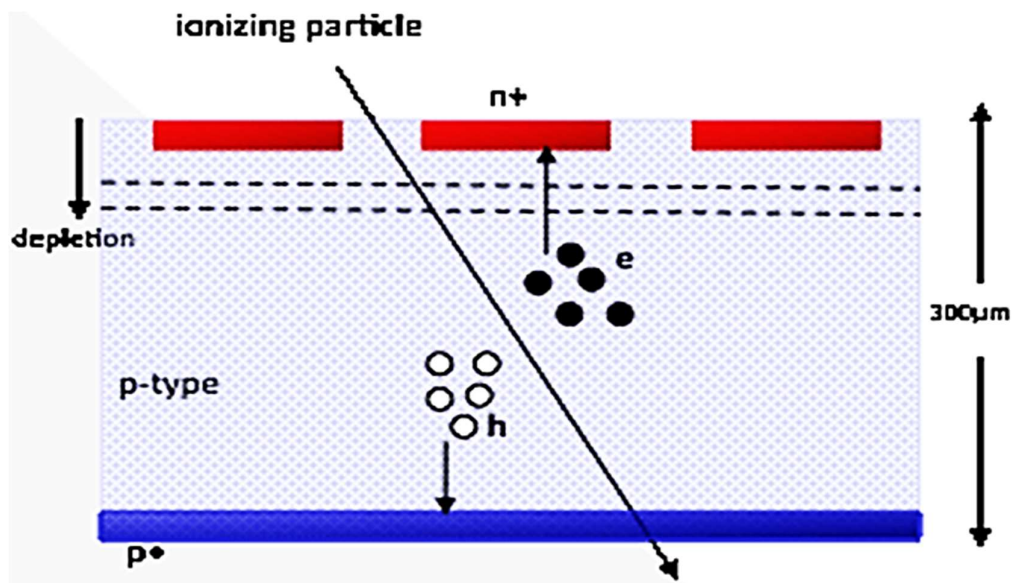


Figure 1.17 Schéma d'un détecteur planaire [18].

c. 3D

Une technologie de capteur moderne répondant à ces exigences est la technologie du détecteur de silicium 3D voire figure (1.18). Contrairement aux capteurs planaires traditionnels, où les électrodes sont implantées à la surface, dans les détecteurs 3D, les électrodes pénètrent dans la masse du détecteur sous la forme de colonnes verticales à la surface voire figure (1.19). Cela permet de découpler la distance de l'électrode à partir de l'épaisseur du détecteur sensible.

L'avantage est que les bords actifs ou minces sont une caractéristique naturelle de la technologie 3D, ce qui permet de réduire le bord du détecteur insensible.

Mais la technologie 3D se fait au détriment d'un processus de production plus complexe, ce qui entraîne un temps de production plus long, des rendements plus faibles et des coûts plus élevés [11].

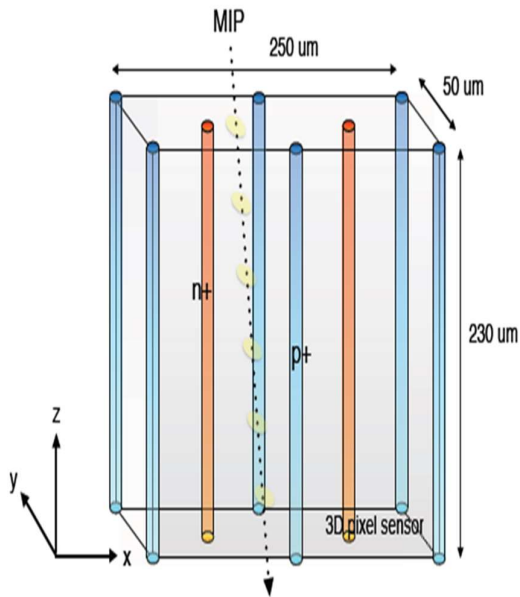


Figure 1.18 Schéma d'un détecteur 3D [11]

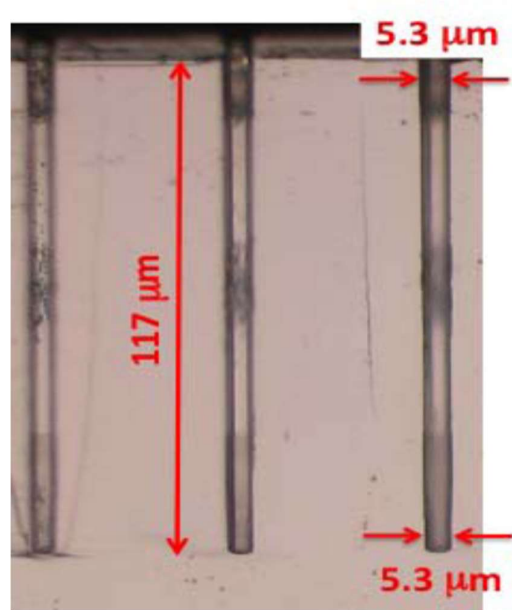


Figure 1.19 Schéma d'un détecteur 3D en réalité [11]

1.8 Détecteur de particule a semi-conducteur avec un bord actif

Dans les détecteurs de rayonnement au silicium, un espace libre d'au moins quelques centaines de micromètres existe normalement entre la jonction polarisée la plus externe et le bord physique. Cela provoque un gaspillage considérable de surface qui pourrait autrement être active. La raison de ce problème est due au fait que les dispositifs sont généralement séparés de la tranche à l'aide d'une scie diamantée. La procédure de découpe introduit des défauts et des fissures sur les bords de l'appareil, qui jouent le rôle de centres de génération-recombinaison. Si la zone d'appauvrissement qui s'étend de la zone active atteint ces défauts, un courant de fuite élevé peut être absorbé par le détecteur. Par conséquent, une mise en page correctement conçue doit prendre en compte la nécessité d'un écart raisonnablement important entre la zone active et la région découpée. De plus, pour les applications nécessitant une polarisation inverse élevée, un espace supplémentaire doit être consacré à l'inclusion de structures de terminaison, par ex. plusieurs anneaux de protection, permettant une chute de tension graduelle de la zone active au bord.

Au cours des dernières années, plusieurs approches ont été proposées pour minimiser la zone morte au bord des détecteurs au silicium. Parmi celles-ci figurent les procédures de découpe au laser, qui entraînent une surface de coupe endommagée inférieure, et les structures de terminaison de courant, qui empêchent le courant de fuite d'atteindre la zone active. Le « bord

actif», proposé à l'origine comme caractéristique supplémentaire de la technologie de détection [19].

1.9 Les techniques de garde des composants planar haute tension

Afin de distribuer le potentiel sur la plus grande surface de silicium possible, et donc de diminuer le champ électrique à la surface, il est nécessaire de trouver une technique de protection qui étale au mieux latéralement la zone de charge espace. De nombreuses études ont proposé plusieurs techniques de terminaison pour les structures conventionnelles. On peut citer par exemple : les extensions de jonction implantée « Junction Termination Extension » (JTE), les anneaux de garde « Floating Guard Rings », les plaques de champ « Field Plates », et les couches semi-résistives « Semi Insulating Polycrystalline Silicon » (SIPOS) [5].

1.9.1 Les anneaux flottants

Il existe deux types d'anneaux de garde : l'anneau de garde diffusé et les anneaux diviseurs de champ. Le premier est un anneau faiblement dopé dans la prolongation de la jonction à protéger, tandis que les anneaux diviseurs de champ sont plusieurs anneaux flottants disposés à distance de la jonction.

a. Anneau de garde diffusé

L'anneau de garde diffusé est un caisson faiblement dopé et plus profond que la jonction à protéger (Figure 1.20). En effet, ce mécanisme consiste à mettre en place une jonction cylindrique ayant une tension de claquage supérieure à la jonction cylindrique à protéger. Pour cela, on utilise un caisson moins dopé en périphérie et plus profond que la jonction afin d'assurer la courbure des lignes de champ au bord du caisson. Cependant, pour des tenues en tension importantes, le caisson doit être très profond et très faiblement dopé, ce qui rend difficile la mise en place d'un tel dispositif. Cette technique de garde est donc plutôt utilisée pour des jonctions peu profondes ou des contacts Schottky. Un autre inconvénient est que cette terminaison entraîne un effet parasite sous polarisation directe ou lors de la commutation [20].

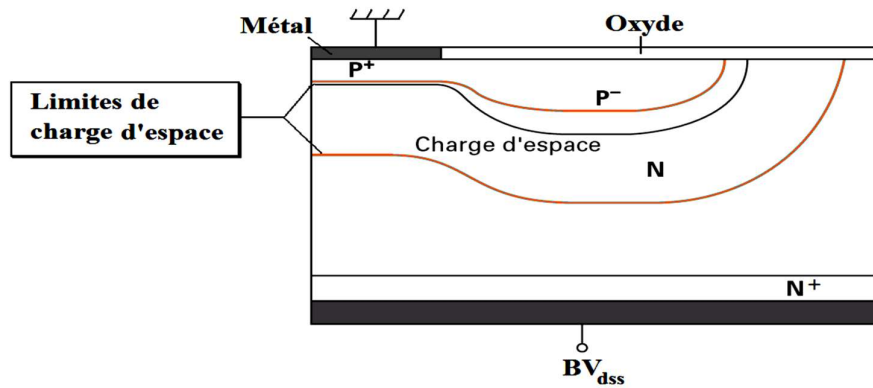


Figure 1.20 Coupe schématique d'une jonction P-N équipée d'un anneau de garde diffusé [20].

b. Anneaux de garde diviseurs de champ

La technique des anneaux diviseurs de champ utilise des caissons non polarisés, dopés autour de la jonction à protéger Figure (1.22). Contrairement à l'anneau de garde diffusé, les anneaux diviseurs de champ n'ont pas besoin d'être profonds ni d'être faiblement dopés. En effet, on peut réaliser les caissons dopés en même temps que l'implantation pour la jonction. Cela ne rajoute donc aucune étape technologique [20].

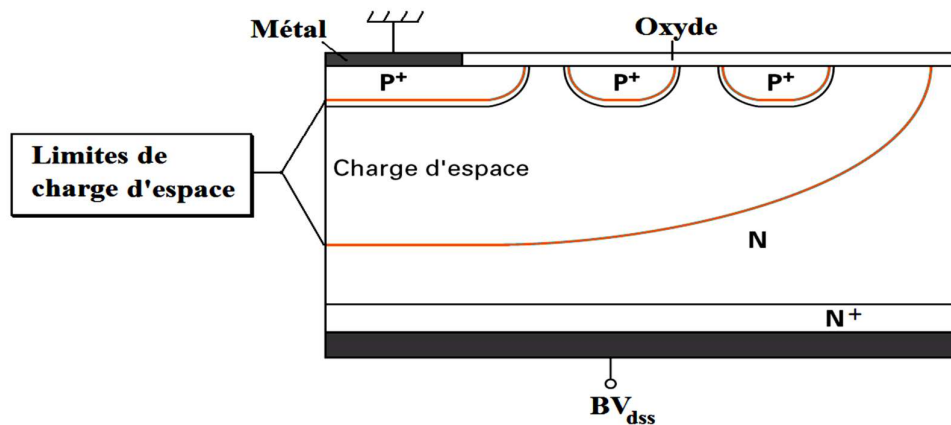


Figure 1.21 Coupe schématique d'une jonction P-N équipée d'anneaux de garde diviseurs de champ [20].

1.9.2 Les paramètres influençant la tenue en tension

La tenue en tension devient alors approximativement la somme de la tension de claquage des anneaux et de la tension de perçage entre les anneaux et la jonction principale. La distance entre les anneaux et la jonction à protéger est calculée pour que la zone de charge d'espace atteigne les anneaux avec un niveau de tension bien inférieur à la tension de claquage. Il est donc

nécessaire d'optimiser la distance entre les anneaux et la quantité d'anneaux nécessaire pour obtenir une tenue en tension proche de celle de la jonction plane infinie.

Cependant, le nombre d'anneaux dépend de la tenue en tension souhaitée et cette technique devient rapidement encombrante à mesure que la tenue en tension souhaitée augmente. Elle sera donc utilisée pour des tenues en tension inférieures au millier de Volts environ [20].

1.9.3 Les avantages et les inconvénients de cette technique

➤ Les avantages

La technique des anneaux flottants permet de minimiser les effets de courbures de jonction à la périphérie de la jonction Planar. Elle est simple à réaliser puisque l'on effectue les diffusions des anneaux en même temps que celle de la jonction principale. De plus, elle n'introduit pas d'étape technologique supplémentaire : elle est donc peu coûteuse [20].

➤ Les inconvénients

- L'inconvénient de cette méthode est la difficulté d'optimisation (le nombre et la position et la distance entre les anneaux sont critiques).
- La définition des règles de conception d'une terminaison de jonction par anneaux flottants est longue en temps de calcul.
- Cette technique consomme une surface de silicium importante.
- Cette technique est utilisée pour des moyennes tensions (jusqu'à 1000 V) et permet d'atteindre généralement une efficacité de 80% (rapport de la tenue en tension obtenue par rapport à la tenue en tension d'une jonction plane idéale) [23].

1.9.4 Les plaques de champ

La plaque de champ est un prolongement de la métallisation constituant le contact de source/cathode. Afin d'éviter de polariser la région en dessous de ce prolongement, un diélectrique est placé entre le silicium et la métallisation Figure (1.22). Lorsque le composant est sous polarisation inverse, la zone de charge d'espace se prolonge le long de la plaque de champ, éloignant la courbure des lignes de potentiel de la jonction PN et réduisant ainsi le champ électrique. Cependant, il subsiste un pic de champ électrique à la fin de la plaque de champ [20].

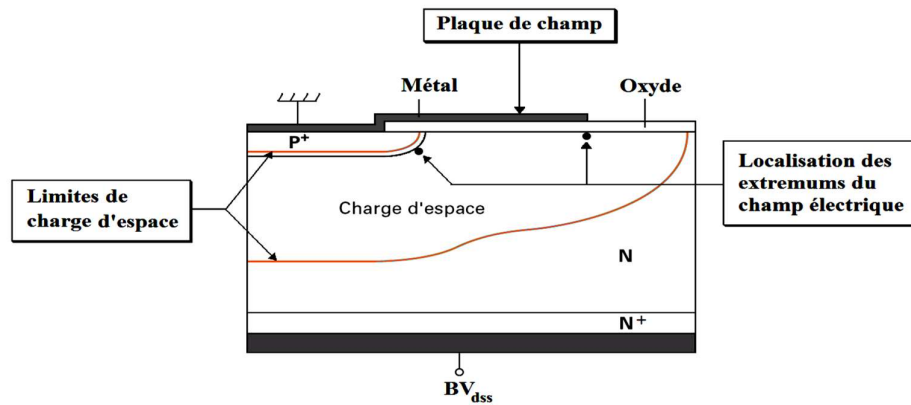


Figure 1.22 Coupe schématique d'une jonction P-N équipée d'une plaque de champ [20].

La plaque de champ permet d'obtenir jusqu'à 80% de la tenue en tension idéale d'une jonction plane infinie. Cependant, l'efficacité de cette technique de garde diminue lorsque l'on augmente la tenue en tension : elle est donc généralement utilisée pour des applications basses et moyennes tensions ou couplée à d'autres techniques [20].

➤ Paramètres influençant la tenue en tension

Deux paramètres doivent être pris en compte pour l'optimisation de la terminaison : la longueur de la plaque de champ et l'épaisseur du diélectrique. En effet, en fonction de la tenue en tension souhaitée, il est nécessaire d'optimiser la longueur minimale de la plaque de champ et l'épaisseur du diélectrique en fonction de son champ électrique critique.

De même, le diélectrique doit être épais, surtout en bout de plaque de champ car c'est là que subsiste le pic de champ électrique [20].

➤ Les avantages et les inconvénients de cette structure

Les avantages

La technique de plaque de champ semble plutôt être réservée aux composants basses et moyennes tensions. En effet, pour des structures en non perçage nous remarquons que le rendement est de l'ordre de 90% pour des tensions inférieures à 500V, de l'ordre de 70% pour des moyennes tensions et de 50% pour des structures hautes tensions. Cette efficacité est meilleure pour des structures en perçage [23].

Les inconvénients

La structure idéale devrait comporter un oxyde d'épaisseur croissante du bord de la jonction à l'électrode de champ, ce qui rend la réalisation technologique plus complexe

Cette technique s'emploie souvent en association avec d'autres techniques de garde : anneaux flottants], couches semi-résistives [23].

1.10 Effet des radiations sur les détecteurs

1.10.1 Effet surfacique

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 déplété, les créations de paires électrons 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-conducteur rendant 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. Les effets sont alors semi-permanents [10].

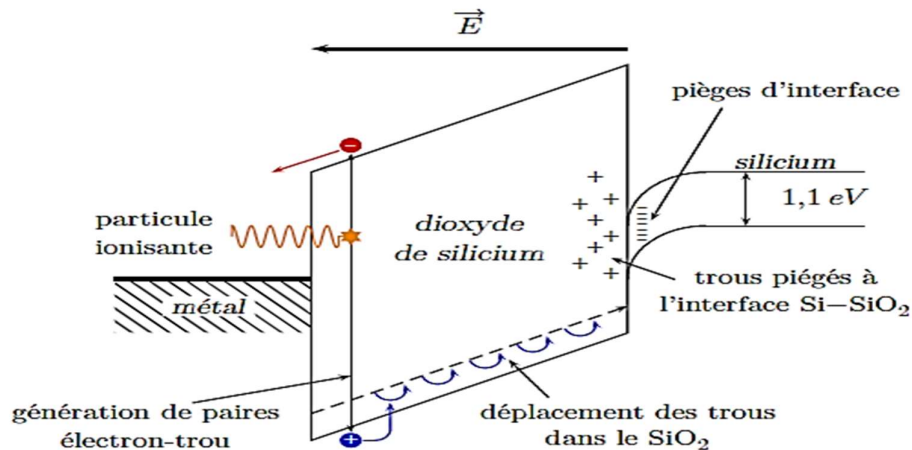


Figure 1.23 Représentation schématique des effets de surface dans un dioxyde de silicium subissant une interaction ionisante [10].

1.10.2 Effet volumique

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 [03].

1.10.3 Les pièges

Les matériaux semi-conducteurs présentent des défauts cristallins, qui peuvent être causés par des liaisons pendantes aux interfaces ou par la présence d'impuretés dans le substrat. Aussi, des défauts sont introduits dans ces matériaux sous l'influence des radiations. La présence de ces défauts ou pièges dans les substrats semi-conducteurs peuvent influencer de manière significative les caractéristiques électriques du dispositif.

Les défauts sont définis dans le détecteur à semi-conducteur comme des pièges chacun est caractérisée par son type (accepteur ou donneur), son niveau d'énergie, sa section efficace de capture pour les électrons et pour les trous, sa densité et son facteur de dégénérescence. En outre, la région à laquelle les défauts sont introduits, peut être spécifiée. L'approche la plus simple d'intégrer des défauts en volume dans le composant est en incorporant des niveaux énergétiques dans la bande interdite représentés par des pièges accepteurs ou donneurs.

Les niveaux d'énergies des accepteurs sont donnés par rapport à la limite de la bande de conduction E_C , les donneurs sont donnés par rapport à la limite de la bande de valence E_V [11].

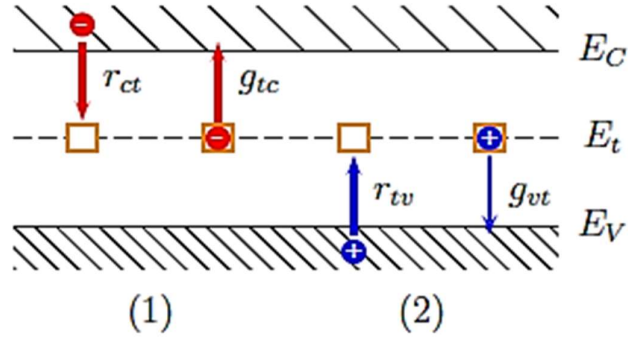


Figure 1.24: Schéma de principe de processus de génération et de recombinaison avec un niveau intermédiaire apporté par un piège pour un électron (1) ou un trou (2). Les taux de transition sont repérés entre les niveaux du piège t , et les bandes de conduction c et de valence v [10].

1.11 Courant de fuite

Le courant de fuite présent dans un détecteur à semi-conducteur est lié à la génération de paires électron-trou suite à la présence de défauts correspondant à des niveaux d'énergie situés plus ou moins au milieu de la bande interdite. Il peut aussi provenir des courants de surface dus aux états formés dans l'interface SiO_2 . L'importance relative de ces deux effets est liée à la structure de la diode et au type d'irradiation. Plusieurs travaux ont montré que ce courant normalisé au volume actif V du détecteur est directement proportionnel à la fluence équivalente $\phi_{eq}(1\text{MeV})$ [9].

$$\frac{\Delta I}{V} = \alpha \phi_{eq} \quad (1.19)$$

Où ΔI est la différence des courants, mesurés à la déplétion totale, avant et après irradiation, est la fluence équivalente à des neutrons de 1 MeV exprimée en particules/ cm^2 et le paramètre α est le facteur de proportionnalité. Ce dernier présente l'avantage d'être indépendant du type de détecteur (processus de fabrication, type n ou p , résistivité...) et de la nature de l'irradiation, comme on peut le constater sur la figure (1.25) [9].

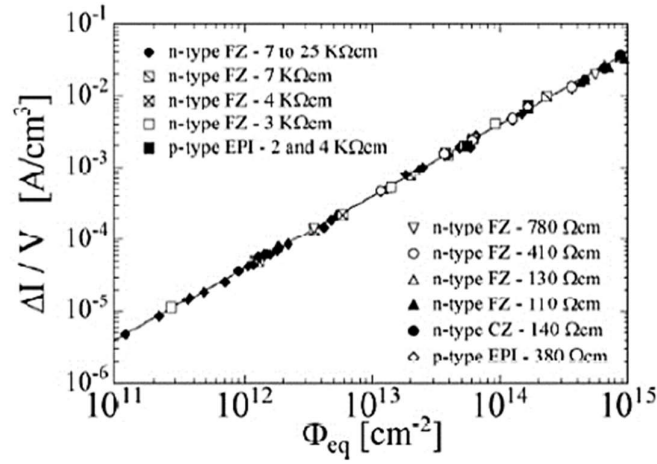


Figure 1.25 Courant de fuite en jonction de la fluence pour différents types de détecteur.

1.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté tous d'abord notre travail dans contexte est l'expérience ATLAS au niveau du CERN. Par la suite nous avons fait un rappel succinct sur les notions de base des semi-conducteurs ainsi que les équations fondamentales qui les régissent 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 dans le cadre de la physique des hautes énergies. De ce fait, nous l'avons décrite à travers son mode de fonctionnement.

Ensuite nous avons présenté le détecteur de particules à bord actif et l'utilité des deux techniques de terminaison, à savoir, l'anneau de garde flottant et les plaques de champs qui vont être l'objet de notre travail de simulation.

Nous avons clôturé ce chapitre en citant les effets de radiations sur un détecteur ainsi que le courant de fuite, dans le chapitre suivant on va représenter le logiciel de simulation qu'on a utilisé dans notre cadre d'étude.

2.1 Introduction

Dans notre travail nous avons utilisé un logiciel de simulation technologique (TCAD), pour étudier l'effet de deux techniques de garde sur un détecteur de particule a bord actif, mais il faut tout d'abord connaître quelques notions principales sur la simulation en générale et sur ce logiciel en particulier.

2.2 Le rôle de la stimulation

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. Le rôle principal du simulateur est de faire baisser le nombre des étapes d'itérations nécessaires pour la fabrication du composant avec certaines propriétés désirées. Un simulateur utilisé pour un composant semi-conducteur donne les données suivantes comme résultats :

- Caractéristiques (I-V), (C-V), (Q-V), (G-V).
- Courbe à 2D inclus la courbe d'une grandeur comme par exemple le potentiel en fonction de la distance verticale d'un composant.
- La courbe à 3D inclus un autre paramètre par exemple la distance verticale z [24].

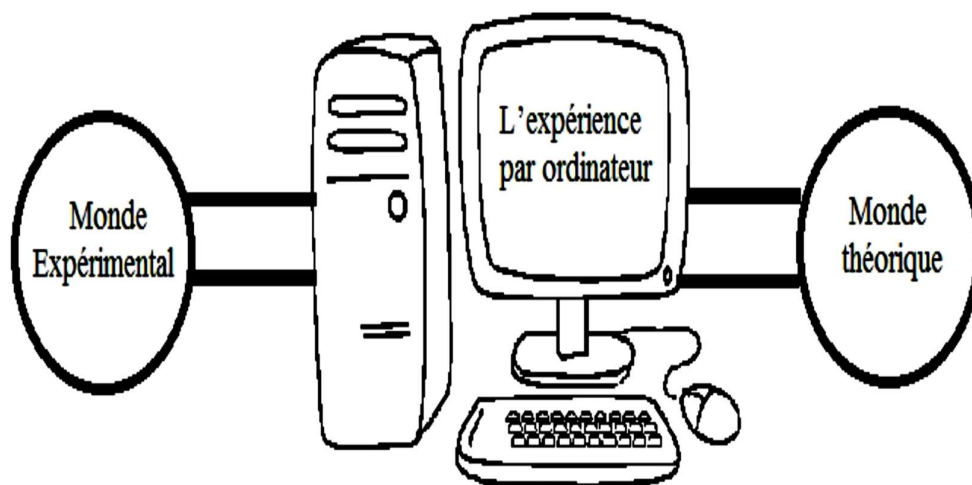


Figure 2.1 Le rôle de la simulation.

2.3 SILVACO-TCAD

SILVACO est une société Américaine, « Silvaco International Company » ayant son siège à Santa Clara en Californie. Elle a été fondée en 1984 par le Dr. Ivan Pesic qui a exposé les outils d'extraction des paramètres d'une structure UTMOS. Elle est une des principaux fournisseurs de chaînes professionnelles de logiciels de simulation par éléments finis et de conception assistée par ordinateur [24].

2.4 Présentation de l'ogiciel de stimulation «SILVACO-TCAD»

Le logiciel TCAD-SILVACO est un ensemble d'outils permettant la simulation physique des dispositifs et des systèmes électroniques qui permet de concevoir et modéliser les performances des dispositifs à semi-conducteur, en incluant les propriétés électriques, optiques et thermiques avant la fabrication des prototypes d'essais. L'outil de calcul de ce logiciel résout des équations différentielles issues de la physique du composant comme celles de la diffusion ou de transport pour des géométries discrètes.

Deux logiciels principaux composent généralement cet ensemble d'outils dédiés à la simulation composant, à savoir, le simulateur de procédé de fabrication (ATHENA) et le simulateur de composants (ATLAS). Le premier permet de simuler les étapes d'implantation, de dépôt, de gravure, de recuit et d'oxydation. Le second permet la simulation des caractéristiques électriques d'un composant (I-V, C-V, I-t, etc.) comme par exemple une diode ou un transistor.

L'avantage majeur d'un simulateur est de visualiser dans l'espace des phénomènes physiques difficilement accessibles et observables en réalité. Il nous aide beaucoup dans les projets de recherche et de développement car il optimise le temps des essais et par conséquent réduit le coût de conception et de fabrication des dispositifs électroniques.

Les simulateurs TCAD (Technology Computer-Aided Design) ont pour but d'économiser le temps et le coût de développement, et ainsi de pouvoir envisager et optimiser des solutions pour améliorer les performances des dispositifs. Ils sont très utiles dans le développement de beaucoup de projets de recherches. Ce logiciel inclut des modèles physiques qui emploient des méthodes et des algorithmes numériques efficaces, des techniques de maillage, et l'utilisation des solutions linéaires, etc. afin d'obtenir des résultats très proches de celles de la pratique.

2.4.1 ATHENA

ATHENA est un simulateur désigné pour la création des structures avec une bonne résolution des mailles, et permet l'implantation ionique et la diffusion des impuretés et l'oxydation et d'autres processus technologiques de fabrication.

2.4.2 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 propres 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 (2.2) 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 » [24].

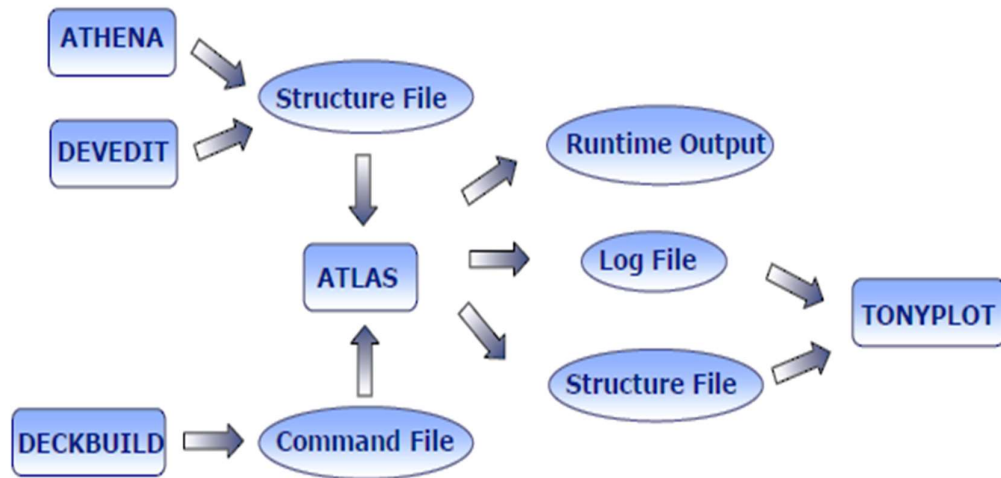


Figure 2.2 Les entrées et les sorties d'ATLAS.

2.4.3 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 : ATHENA, ATLAS, SSUPREM3, etc. L'affichage des résultats de simulation tels que les paramètres technologiques (profondeur de jonction, concentration des porteurs) et même les paramètres électriques (tension de seuil, courant, etc.) est effectué à l'aide d'une fenêtre d'information (Output Window) [25].

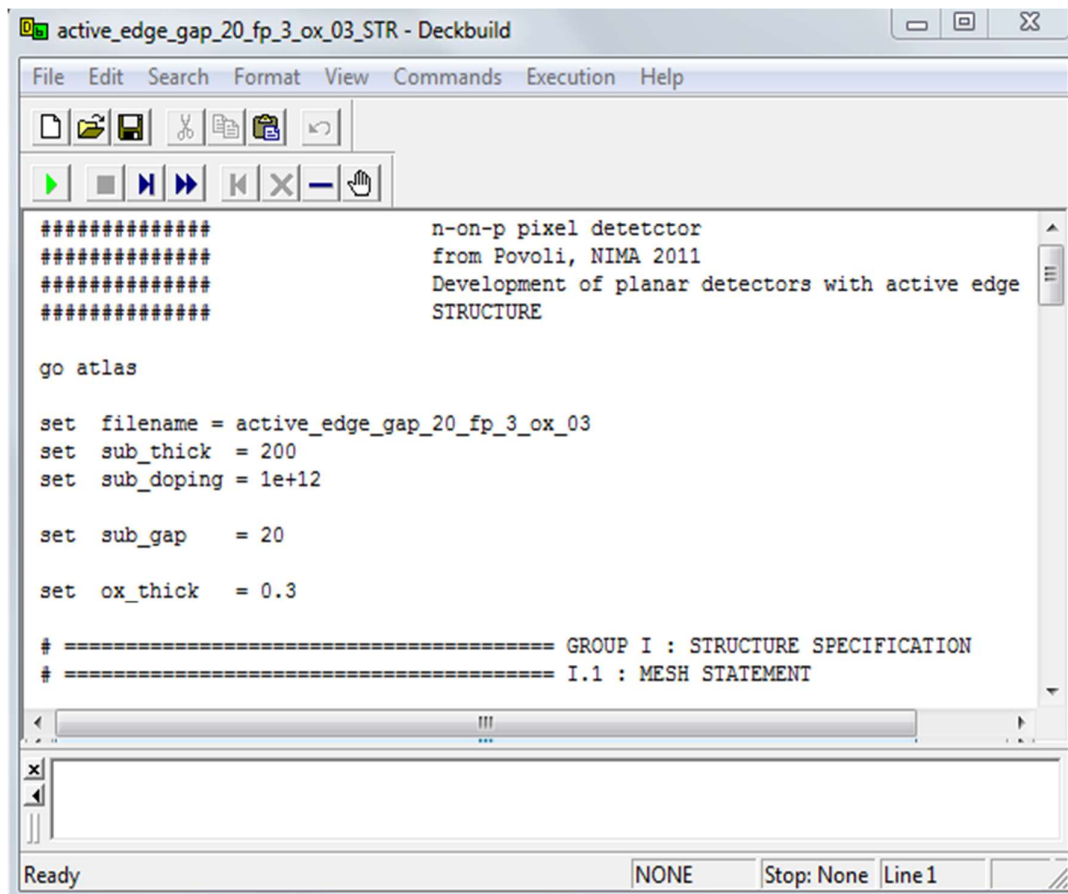


Figure 2.3 Programme de simulation défini dans l'environnement Deckbuild.

2.4.4 DevEdit

Est un environnement où sont dessinés la structure (dimension, dopage) et son maillage.

2.5 Ordre des commandes

2.5.1 Spécification de la structure

La spécification de la structure est effectuée en définissant le maillage, les régions, les électrodes et le niveau de 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.

La méthode numérique utilisée pour résoudre les équations physiques est la méthode des éléments finis. Son principe de base est la discrétisation par éléments finis des équations à traiter. Les éléments qui définissent la maille élémentaire utilisée par le simulateur sont des prismes.

Le choix de maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et l'exactitude des résultats, tel qu'un maillage épais produit une rapide simulation, mais les résultats sont moins précis. Tandis qu'un maillage fin produit un ralentissement de la simulation, mais des résultats plus précis. Donc le maillage fin est plus intéressant de point de vue résultat dans la simulation [24].

Le format de définition de maillage est écrit généralement comme celui-ci :

X. Mesh LOCATION = <VALEUR> ESPACEMENT = <VALEUR>

Y. Mesh LOCATION = <VALEUR> ESPACEMENT = <VALEUR>

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).

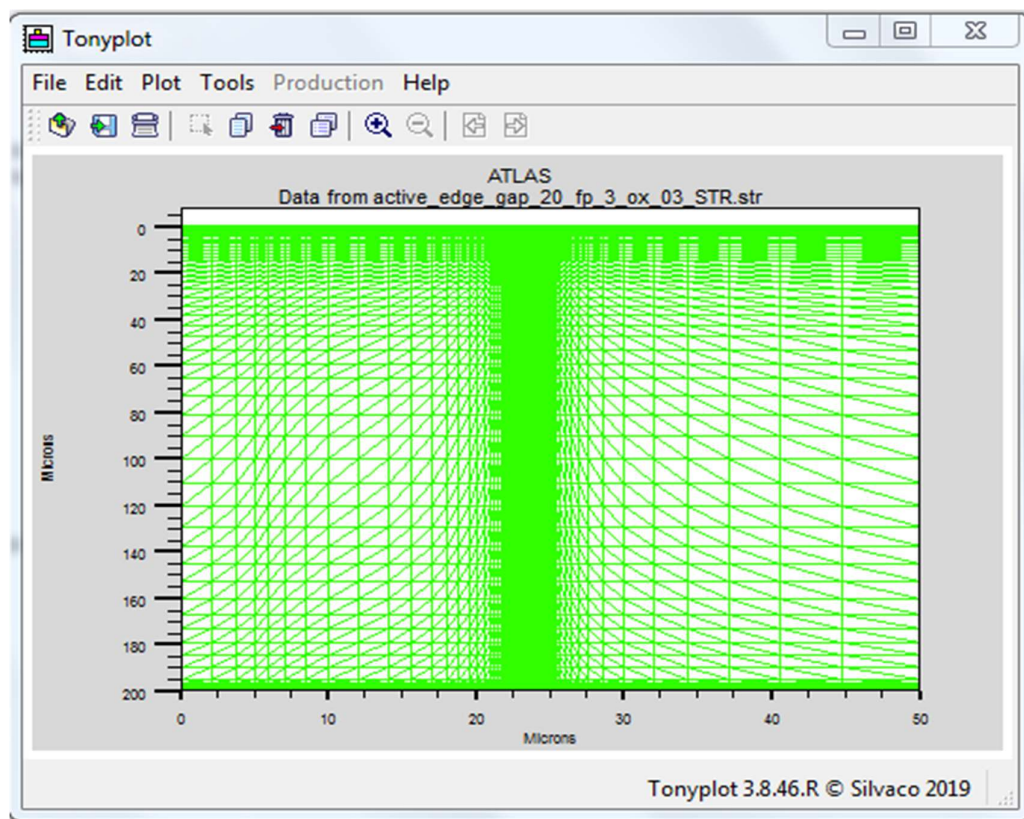


Figure 2.4 Définition du maillage avec ATLAS.

b. Région

Après la bonne définition de maillage, le format pour définir les régions est comme suit :

Région nombre = <intègre> <material_type> <position des paramètres>

Dans ATLAS on peut avoir presque 200 régions différentes.

c. Electrode

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

ELECTRODE NAME = <electrode name> <position_parameters>

Cette instruction annonce le nom de l'électrode et sa position. On peut spécifier jusqu'à 50 électrodes et plus.

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

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

Electrode name=cathode bottom

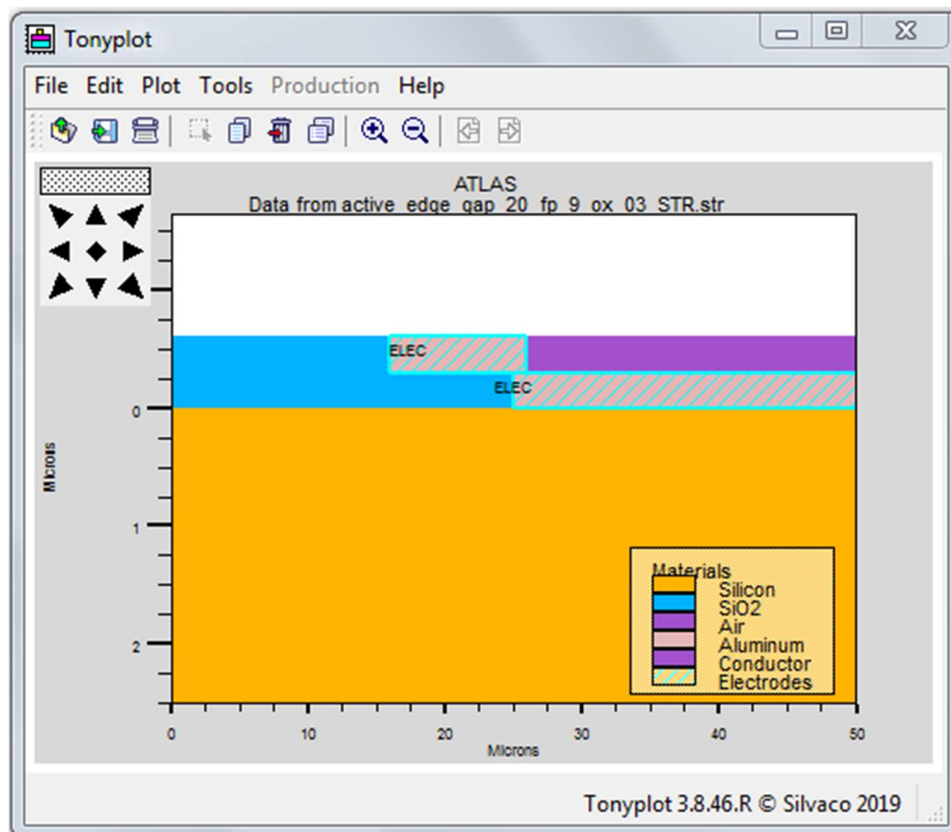


Figure 2.5 Définition des électrodes avec Atlas.

d. Dopage

On finit la spécification de la structure par le dopage, la syntaxe pour définir le dopage est la suivante :

Doping < distribution _ type > < dopant _ type > < position _ paramètres > Le dopage peut être de type N ou P. Le type de distribution peut être uniforme ou gaussienne.

2.5.2 Spécification des modèles des matériaux

Après la spécification du maillage et du dopage, on peut facilement modifier les caractéristiques des matériaux utilisés (électrodes, substrat) et changer leurs paramètres. Elle se compose de quatre parties : matériaux, modèles, contact et interface.

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...

Dans notre étude nous avons utilisé un seul matériau qui est le silicium.

La syntaxe de déclaration du matériau est définie par l'instruction suivante :

MATERIAL MATERIAL=Silicon EG300=1.12 MUN=1100 MUP=400.

b. Modèles

Les modèles physiques sont spécifiés par les deux instructions MODELS et IMPACT.

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.

Dans notre travail la syntaxe de déclaration de modèle est définie par l'instruction suivante :

MODELS fldmob conmob srh auger bgn print temperature=300

Dans le cas où il y a une ionisation, il existe un modèle proposé par Selberher, on introduit l'instruction suivante :

IMPACT SELB.

Ce modèle est recommandé pour la plupart des cas et permet d'inclure un paramètre qui dépend de la température. Il est utilisé en général pour la polarisation inverse.

c. Contact

Si une électrode est en contact avec un semi-conducteur, par défaut, ATLAS le reconnaît comme un contact ohmique qui 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 [26].

Interf qf= valeur'

2.5.3 Spécification des méthodes numérique de calcul

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 sont utilisée dans « Silvaco-Atlas » : Méthode de Gummel, Newton, bloc.

Pour la méthode GUMMEL, elle est utilisée pour la résolution des équations a une seule inconnue et des variables fixées constantes, la résolution se fait d'une manière itérative jusqu'à la solution est achevée.

La deuxième méthode NEWTON est la méthode la plus répandu dans le programme Atlas, elle est utilisée pour résoudre des systèmes d'équations à plusieurs inconnues.

La troisième méthode block est une combinaison des deux méthodes, elle est utile pour les systèmes d'équation mixtes.

2.5.4 Spécification de solution

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

a. Log

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

b. Slove

L'instruction SOLVE suit l'instruction LOG. Elle effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation.

c. Load

L'instruction de la commande LOAD est :

```
load inf= nom_de_fichier_1V.str master
```

La commande LOAD a un rôle bien précis, concernant le chargement d'informations de l'état président pour l'utiliser dans l'état suivant.

d. Save

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

```
save outf= nom_de_fichier_1V.str
```

2.6 Analyse des résultats

a. TONYPLOT

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

```
tonyplot Nom_de_fichier.log
```

b. EXTRACT

Cette commande est utilisée pour extraire les valeurs avec une très bonne précision des paramètres des deux types des fichiers log ou structure [27].

```
extract init infile = nom_de_fichier.log
```

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes commandes utilisées dans le logiciel de simulation technologique Atlas de SILVACO que nous avons utilisées dans notre programme pour étudier l'effet des deux techniques de terminaison, à savoir, les plaques de champ et l'anneau de garde flottant sur un détecteur de particule a bord actif.

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exposer les principaux résultats obtenus par simulation d'une structure dédiée pour la détection des particules, à l'aide des outils TCAD du logiciel SILVACO, en particulier l'outil de simulation électrique ATLAS. Nous commencerons par la présentation des étapes de simulation ainsi que les résultats obtenus pour les différents cas de positionnement d'un anneau de garde et l'ajout des plaques de champs et les performances électriques extraites pour chaque cas. Enfin, nous terminerons par une conclusion.

3.2 Structure sans terminaisons

3.2.1 Description de la structure

La figure (3.1) représente une vue schématique de la structure 2D que nous allons étudier avec toutes les dimensions géométriques. Cette structure est un détecteur de particules réalisées sur un substrat en silicium de type n avec un dopage uniforme de 10^{+12} cm^{-3} avec une épaisseur de $200 \mu\text{m}$. Le pixel a un dopage de type p avec une concentration de 10^{+18} cm^{-3} et une profondeur de jonction de $1 \mu\text{m}$. La largeur de la structure simulée est de $60 \mu\text{m}$ pour un gap de $30 \mu\text{m}$.

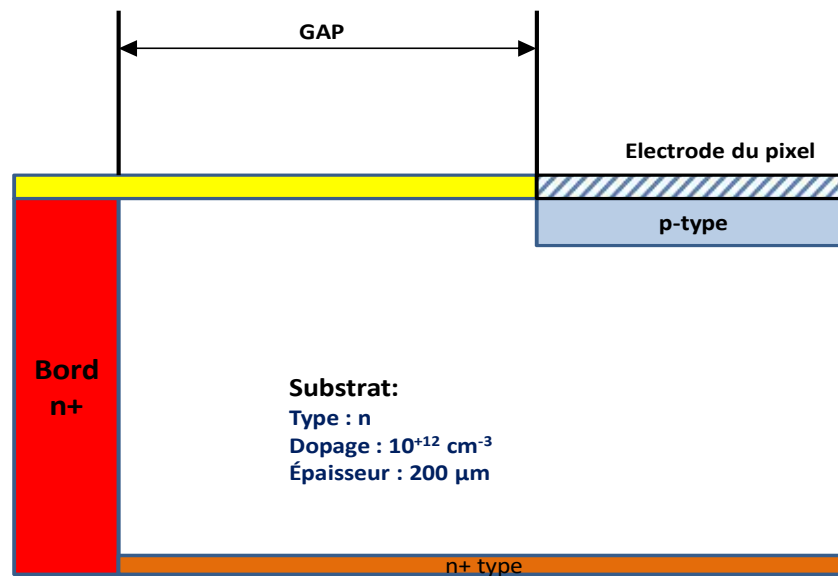


Figure 3.1 Représentation schématique de la structure.

3.2.2 La structure sous ATLAS

La figure (3.2) représente la structure 2D simulée avec ATLAS.

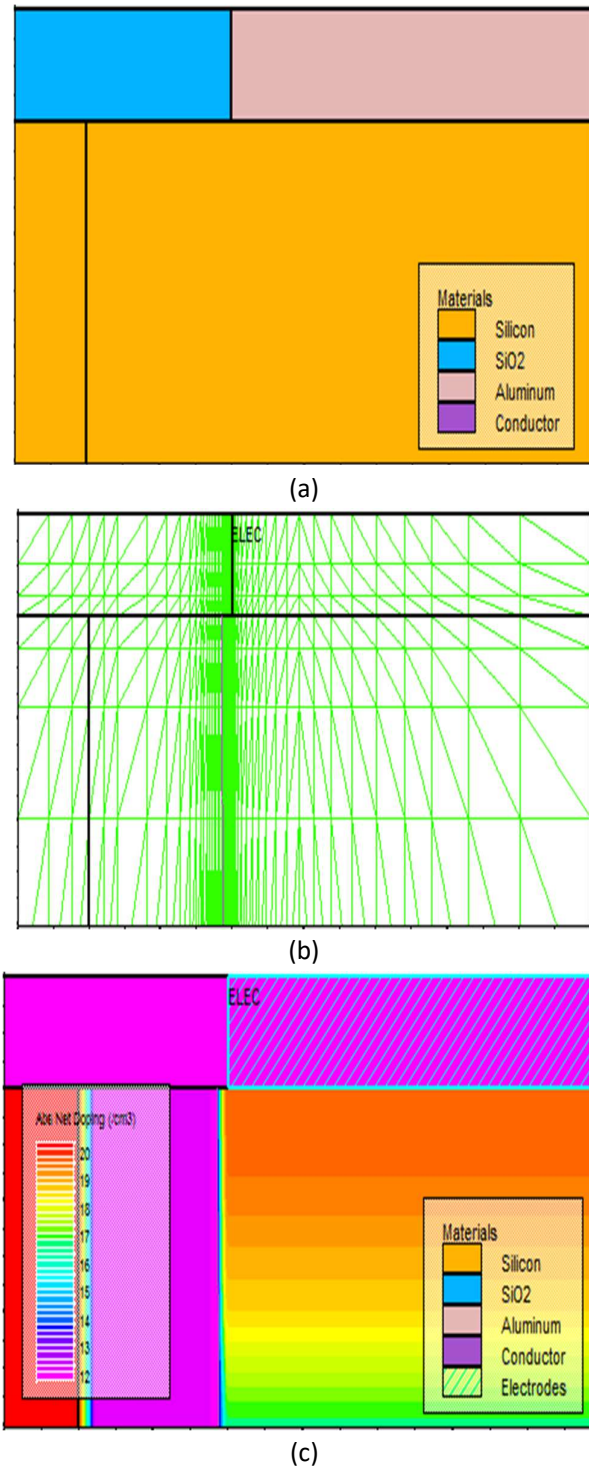


Figure 3.2 Représentation schématique de la structure sous ATLAS. a) matériaux, b) maillage et c) dopage.

3.2.3 L'influence de l'épaisseur d'oxyde (μm)

Le choix de l'épaisseur d'oxyde doit être précis. La figure (3.3) représente la variation de la tension de claquage en fonction de l'épaisseur d'oxyde pour trois valeurs de gap. On remarque que la tension varie lentement. Pour cela on a choisi la valeur $0.3\mu\text{m}$ pour l'oxyde car elle permet d'avoir un composant à petite dimension au même temps avec de bon résultats.

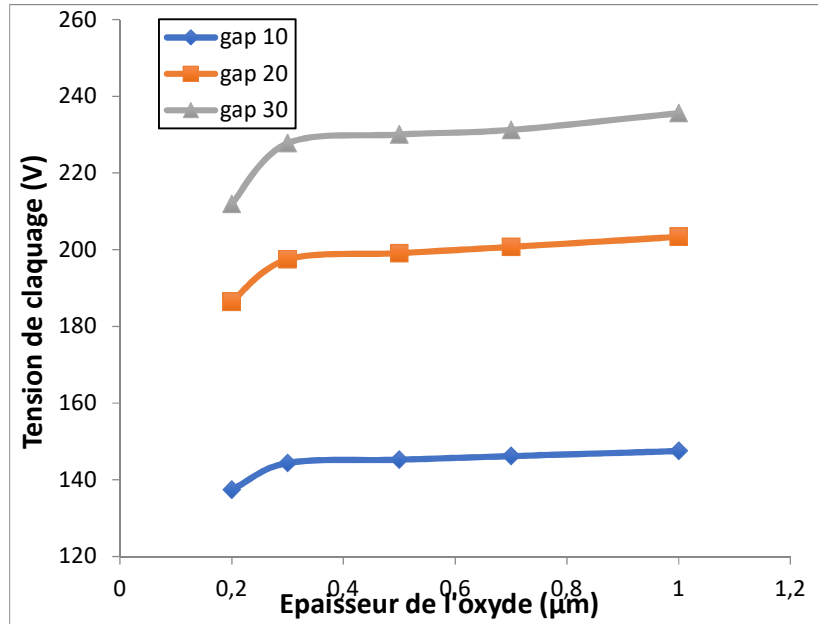


Figure 3.3 Variation de la tension de claquage en fonction de L'épaisseur d'oxyde pour les trois Gap.

3.2.4 L'influence de la charge dans l'oxyde (cm^2)

La figure (3.4) représente les caractéristiques courant-tension (I-V) de la structure sans terminaison avec un gap de $30\mu\text{m}$ sans charge et avec charge. Les charges prises dans cette étude sont 10^{+10} cm^{-2} , $1 \times 10^{+11}\text{ cm}^{-2}$, $5 \times 10^{+11}\text{ cm}^{-2}$ et $1 \times 10^{+12}\text{ cm}^{-2}$.

On remarque bien que la tension de claquage diminue en fonction de l'augmentation de la charge. La tension de claquage passe de 263.904 V pour une structure sans charges à 54.941 V pour une charge de $1 \times 10^{+12}\text{ cm}^{-2}$.

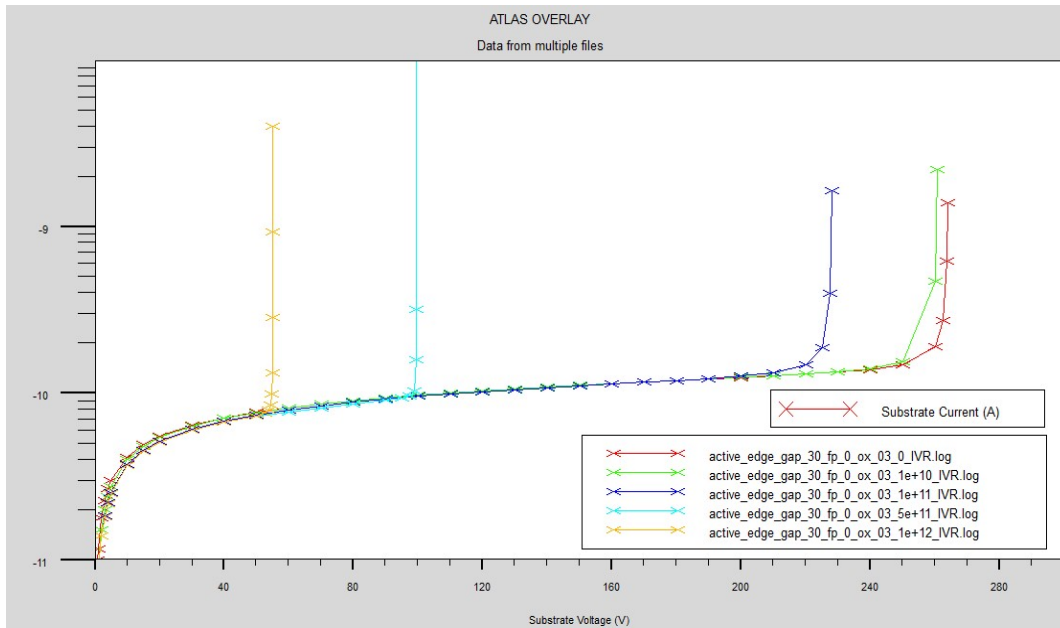


Figure 3.4 Caractéristiques courant-tension d'une structure sans terminaison, sans et avec charge dans l'oxyde.

La figure (3.5) représente la variation de la tension de claquage on fonction de la charge dans l'oxyde en appliquant cette dernière pour les trois valeurs du Gap.

On remarque que pour les trois valeurs du Gap (10,20,30) la tension de claquage diminue jusqu'à une valeur de la charge d'oxyde égale à $5e+11$ après cette valeur une stabilisation est aperçue et on ne constate aucune influence de charge sur les Gap à partir de cette valeur. A la fin on voit que la tension de claquage pour le Gap 30 est plus sensible que pour les autres Gap.

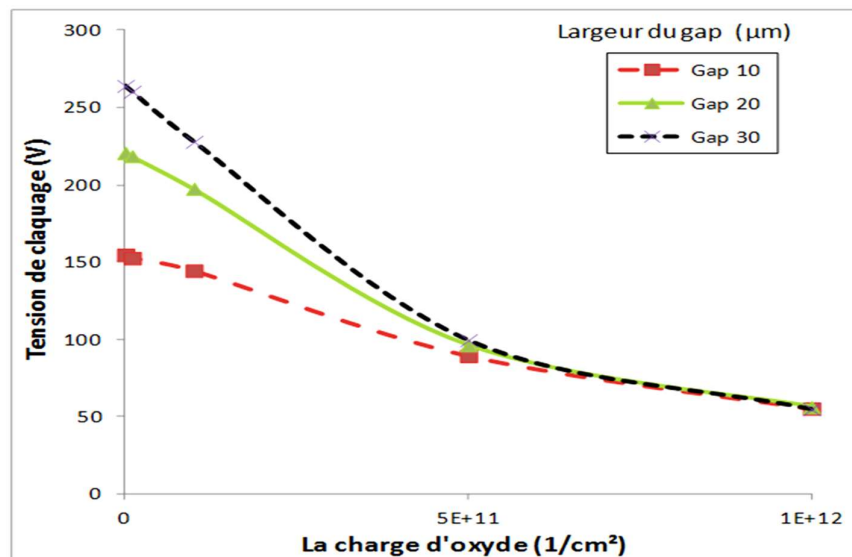


Figure 3.5 Variation de la tension de claquage en fonction de la charge d'oxyde pour les trois valeurs de Gap.

3.2.5 Le champ électrique

La figure (3.6) représente le champ électrique dans la structure sans terminaison et sans charge et la figure (3.7) représente ce dernier avec charge, pour une tension de polarisation de 50 V. pour la première figure représente le profil du champ électrique dans le volume, et la deuxième figure représente une ligne de découpe du champ à 0.1 μm de la surface.

Pour la structure sans charge, le champ électrique maximal avoisine les 0.08 MV/cm, par contre il atteint presque 0.5 MV/cm dans la structure avec charge. De fait, la charge dans l'oxyde fait augmenter le champ électrique localement, ce qui en résulte une diminution de la tension de claquage.

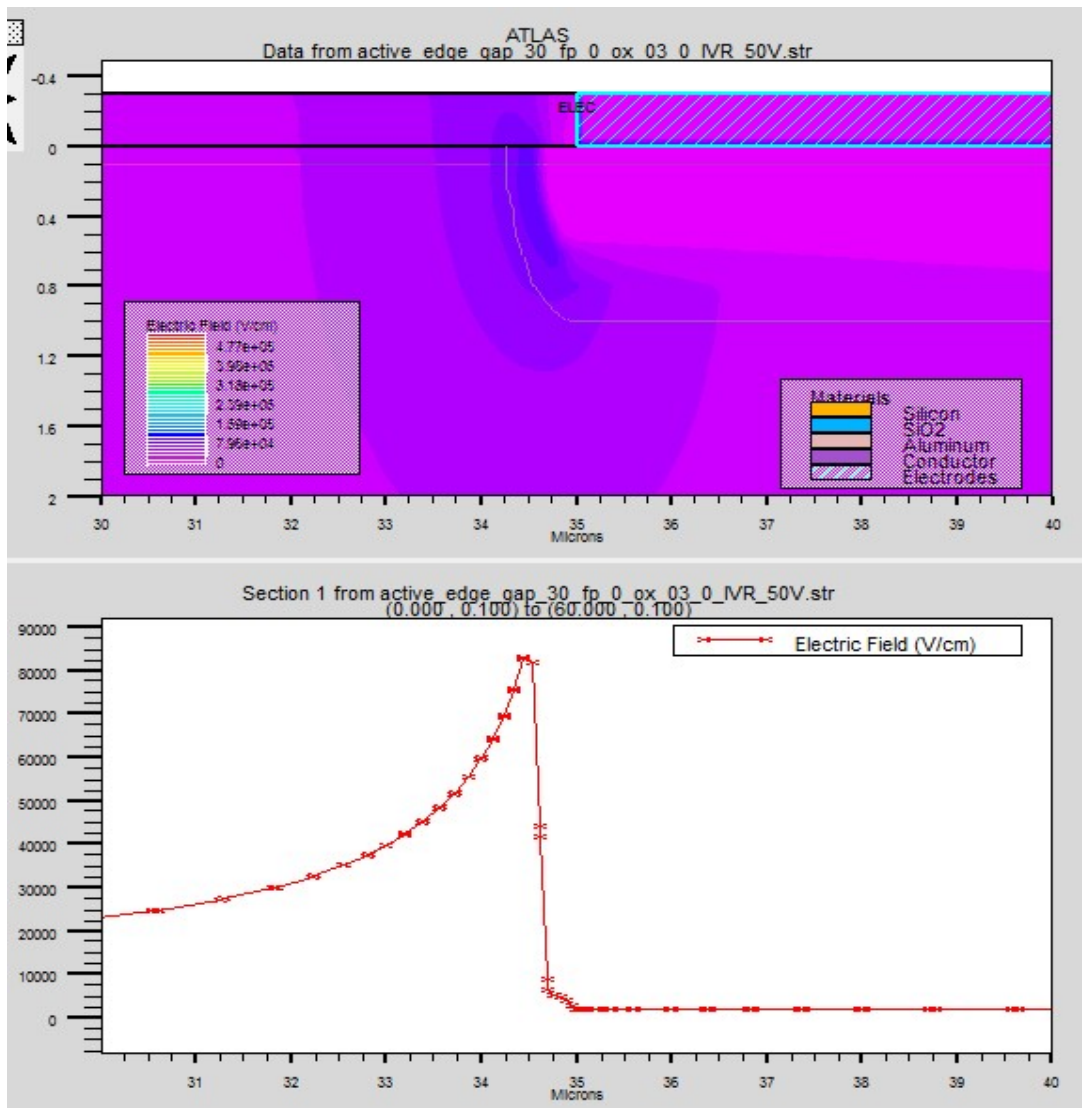


Figure 3.6. Représentation du champ électrique dans la structure sans charge dans l'oxyde

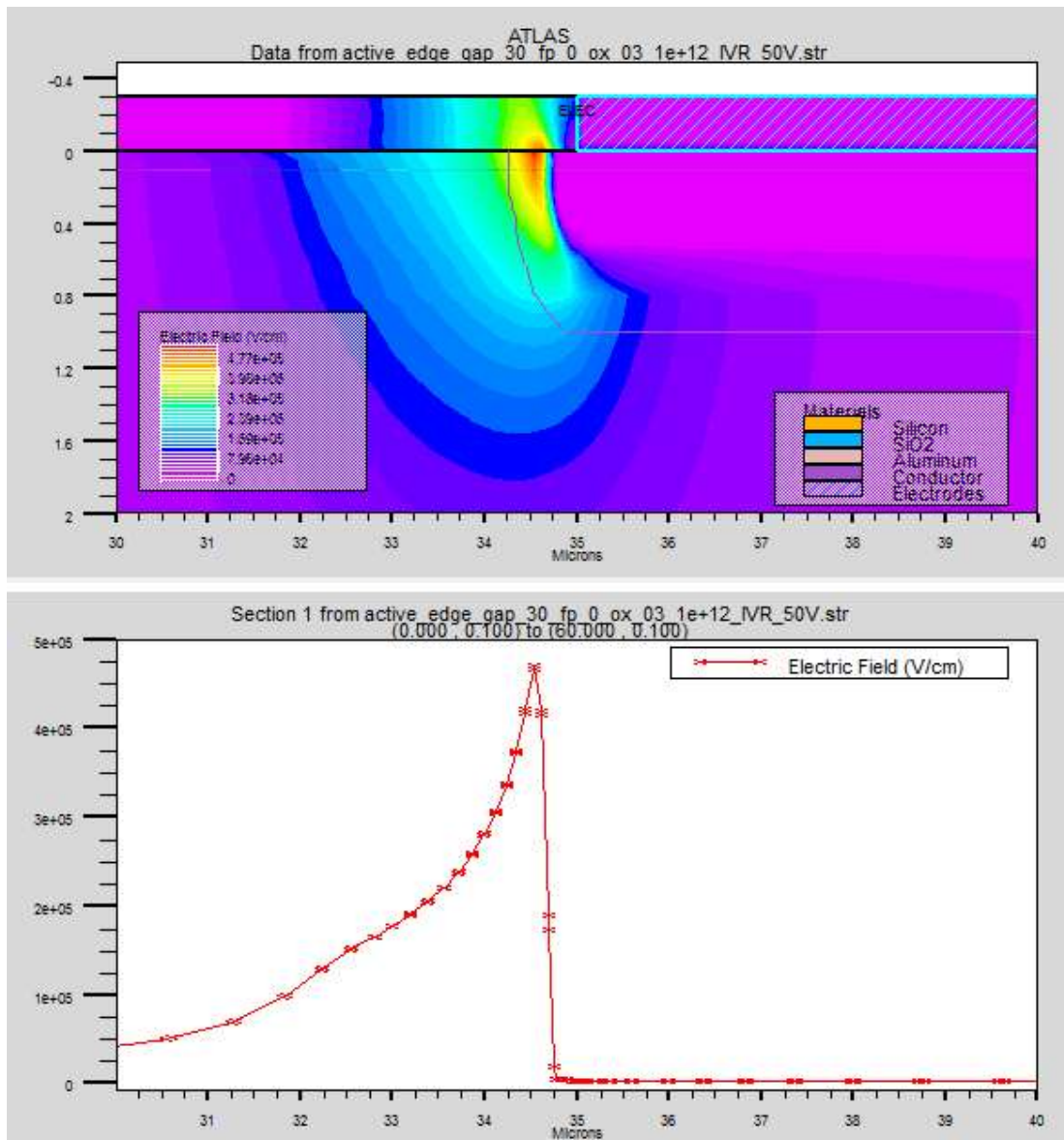


Figure 3.7. Représentation du champ électrique dans la structure avec charge dans l'oxyde.

3.3 Structure avec anneau de garde

Pour augmenter la tension de claquage du détecteur de particules on ajoute une technique de terminaison à ce dernier, appelée anneau de garde. Le rôle de ce dernier est de donner une meilleure répartition du champ électrique à l'intérieur de la structure du détecteur afin d'éviter toute décharge électrique partielle à l'intérieur des diélectriques (micro cavités ou défauts). La figure (3.8) représente une vue schématique de la structure que nous avons étudié avec toutes les dimensions géométriques, cette structure est un détecteur de particules à bord actif avec anneau de garde.

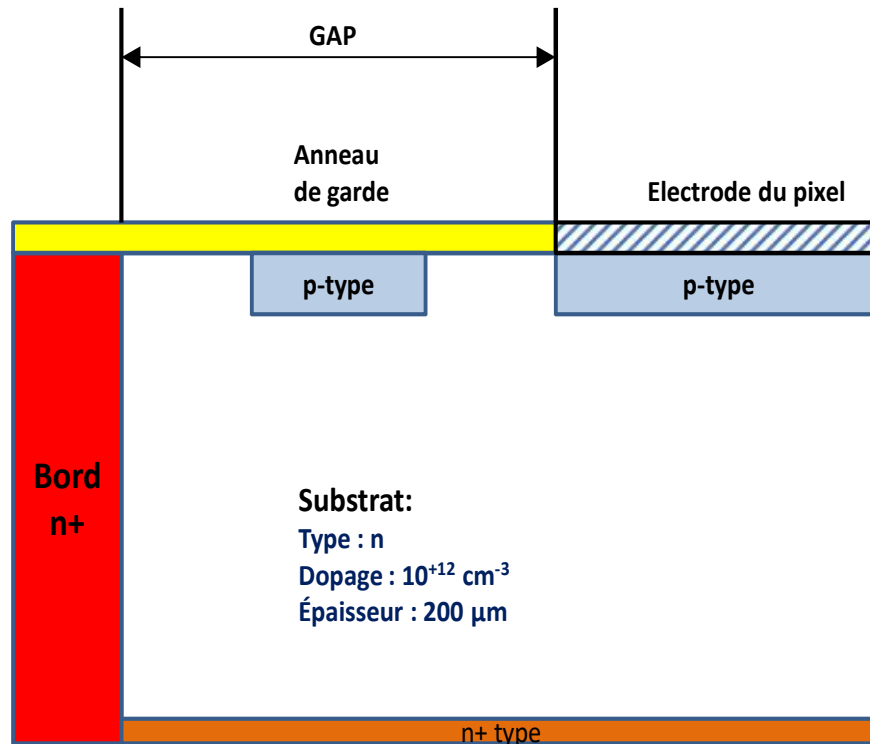


Figure 3.8 Structure avec anneau de grade

3.3.1. Choix de l'épaisseur de l'oxyde

En utilisant la technique de l'anneau de garde comme terminaison avec des composants planaires à haute tension nous avons travaillé avec une épaisseur de $0.3 \mu\text{m}$. Car c'est la valeur qui nous donne presque les mêmes résultats des tensions de claquages que ceux de l'article de référence. [19]

3.3.2 Le positionnement de l'anneau de garde

La méthodologie d'optimisation adoptée consiste à faire changer la position de l'anneau de garde afin d'observer l'influence de ce dernier sur la tension de claquage du dispositif semi-conducteur. Pour cela on fait varier la distance entre l'anneau de garde et le pixel de telle façon que le premier pat qui va prendre ce dernier pour s'éloigné de la région P est de $3 \mu\text{m}$, cette optimisation a comme référence la tension de claquage par rapport à plusieurs positions, et les résultats du graphe simulé par l'outil ATLAS sont en échelle logarithmique.

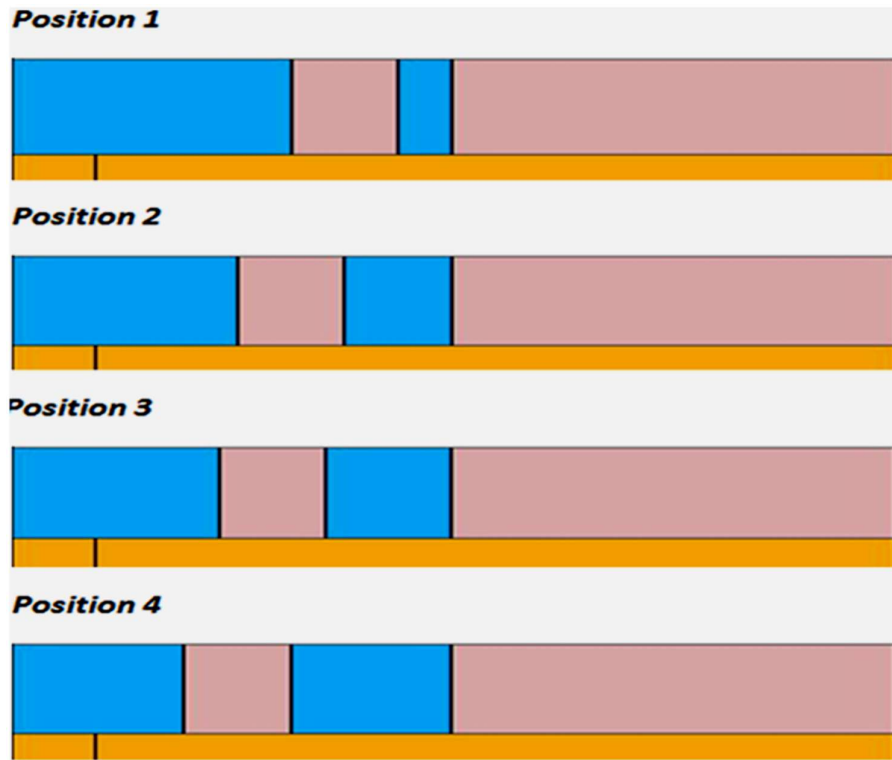


Figure 3.9 Disposition de l'anneau de garde par rapport au pixel.

3.3.3 Gap 20

Dans cette structure, nous avons pris une valeur de 20 μm pour le Gap. Et nous avons fait varier la position de l'anneau de garde vis-à-vis du pixel. Les différents espacements de l'anneau de garde sont : 3 μm , 6 μm , 9 μm et 11 μm .

La figure (3.10) représente les caractéristiques courant-tension (I-V) pour différentes positions de l'anneau de garde. On remarque que la tension de claquage diminue avec l'augmentation de la distance entre l'anneau de garde et le pixel.

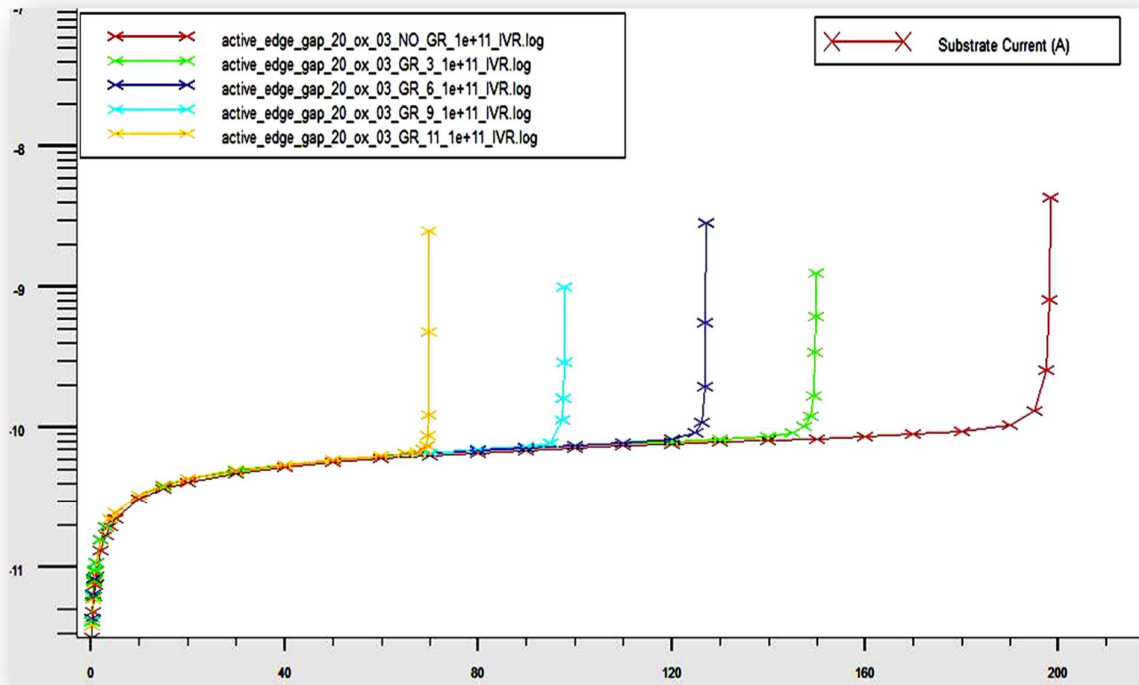


Figure 3.10 Caractéristiques courant-tension pour un détecteur avec différentes positions de l'anneau de garde

La figure (3.11) montre le changement de la tension de claquage en termes du positionnement de l'anneau de garde. On remarque une augmentation brusque de la tension de claquage et la plus grande valeur se trouve à la position neuf, juste après cette position la tension diminue rapidement.

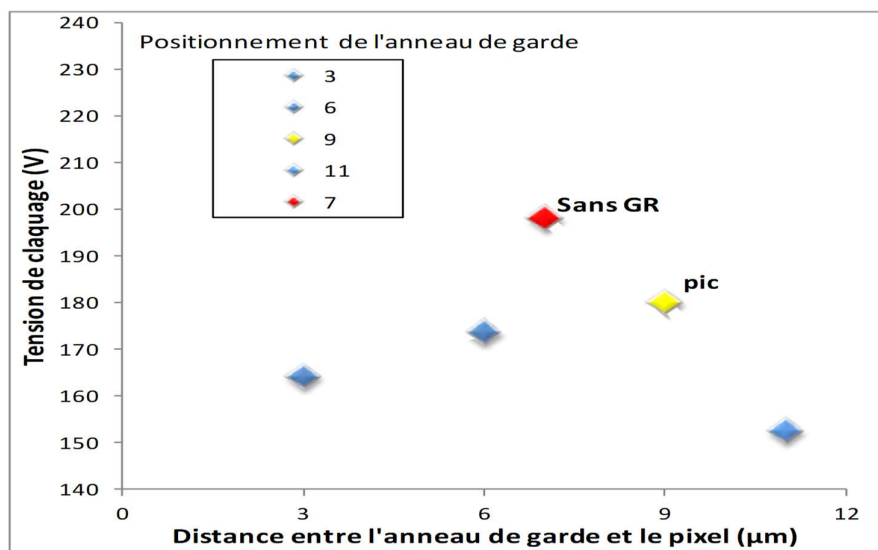


Figure 3.11 La tension de claquage en fonction du positionnement de l'anneau de garde.

Dans ce cas (pour un gap égal à 20 μm) l'anneau de garde n'a aucune influence sur le rendement de la structure car on remarque bien d'après la figure précédente que la valeur de la tension de claquage sans anneau de garde (position 7) est beaucoup plus grande par rapport à celle avec anneau de garde.

3.3.4 Gap 30

La valeur du Gap prise est égale à 30 μm . Le positionnement de l'anneau de garde vis-à-vis du pixel est donné par les valeurs des différents espacements de l'anneau de garde qui sont : 3 μm , 7 μm , 11 μm , 13 μm et 17 μm .

La figure (3.12) représente la variation du courant (I) en fonction de la tension (V), pour différentes positions de l'anneau de garde. On remarque que la tension augmente en valeur absolue avec l'augmentation du courant jusqu'à l'arriver à la tension de claquage.

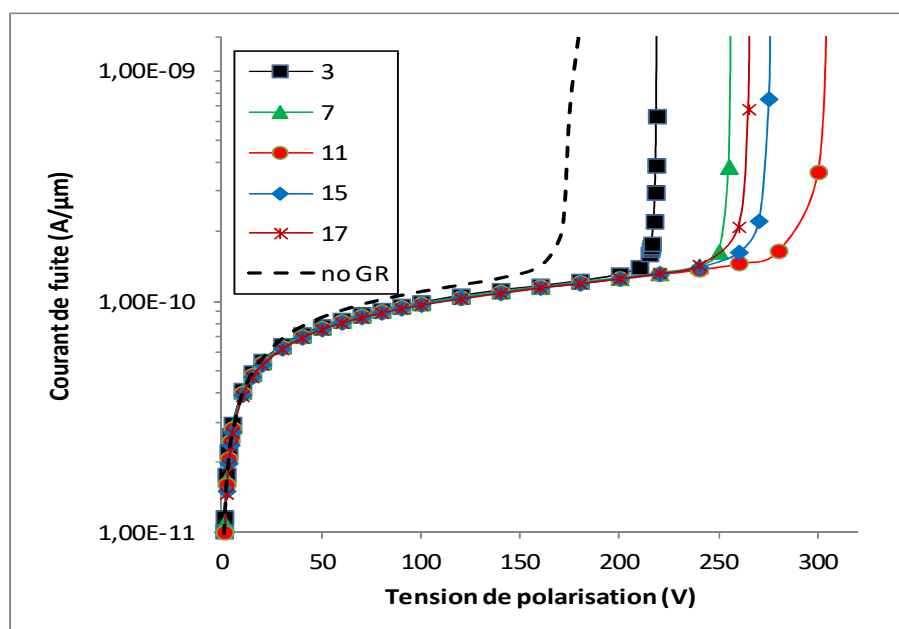


Figure 3.12 Caractéristiques courant-tension pour un détecteur avec différentes positions de l'anneau de garde.

La figure (3.13) montre le changement de la tension de claquage en termes de la position de l'anneau de garde. On remarque une augmentation brusque de la tension de claquage et la plus grande valeur se trouve à la position onze, juste après cette position la tension diminue rapidement. D'après ce graphe la position qui donne un optimum pour un premier anneau de garde ou la tension de claquage est maximum c'est la position onze.

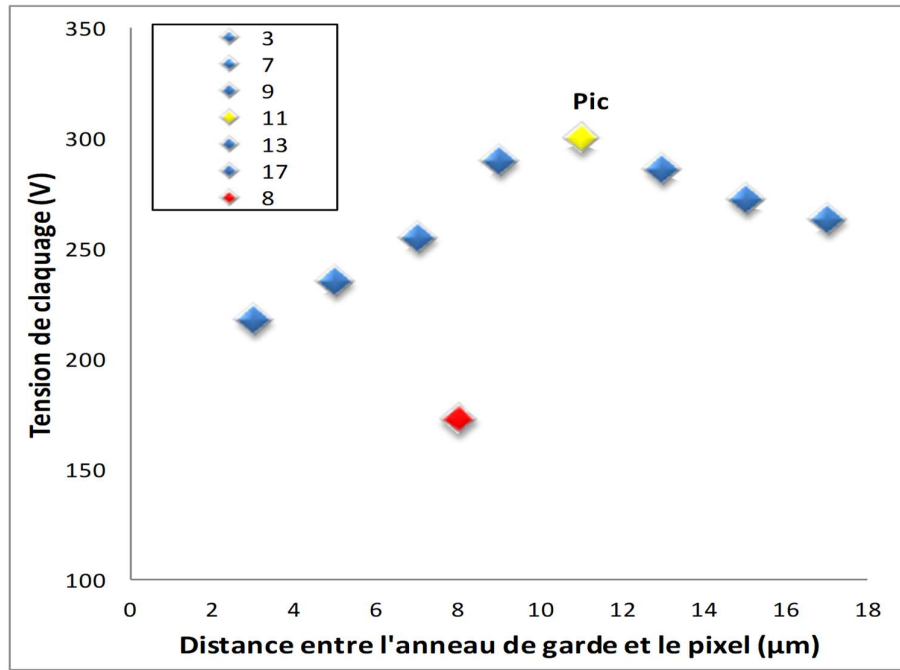


Figure 3.13 La tension de claquage en fonction du positionnement de l'anneau de garde.

Dans ce cas (pour un gap égal à 30 μm) l'anneau de garde influe sur le rendement de la structure car on remarque bien d'après la figure précédente que la valeur de la tension de claquage sans anneau de garde (position 8) est beaucoup plus petite par rapport à celle avec anneau de garde.

3.4 Structure avec plaque de champs

Une structure de plaque de champ est prévue pour terminer l'électrode d'un dispositif semi-conducteur, Le role de cette dernière est de donner une meilleure répartition du champ électrique à l'intérieur de la structure du détecteur afin d'éviter toute décharge électrique partielle à l'intérieur des diélectriques (micro cavités ou défauts). La figure 3.14 représente une vue schématique de la structure que nous avons étudié avec toutes les dimensions géométriques, cette structure est un détecteur de particules à bord actif avec une plaque de champ.

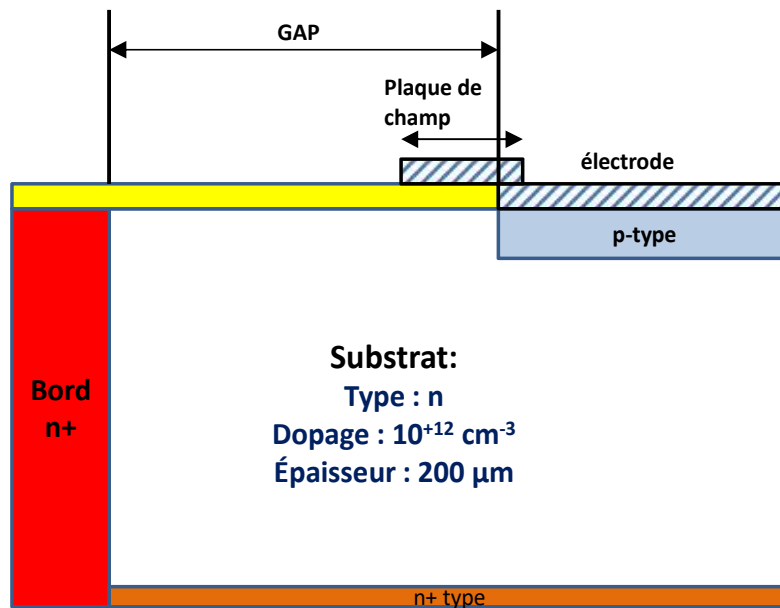


Figure 3.14 Structure avec plaque de champ

3.4.1 La largeur de la plaque de champ

Notre méthodologie d'optimisation consiste à faire varier la largeur de la plaque de champ de plus nous avons fait varier la largeur du gap et l'épaisseur de l'oxyde a fin d'observer l'influence de cette dernière sur la tension de claquage du dispositif semi-conducteur.

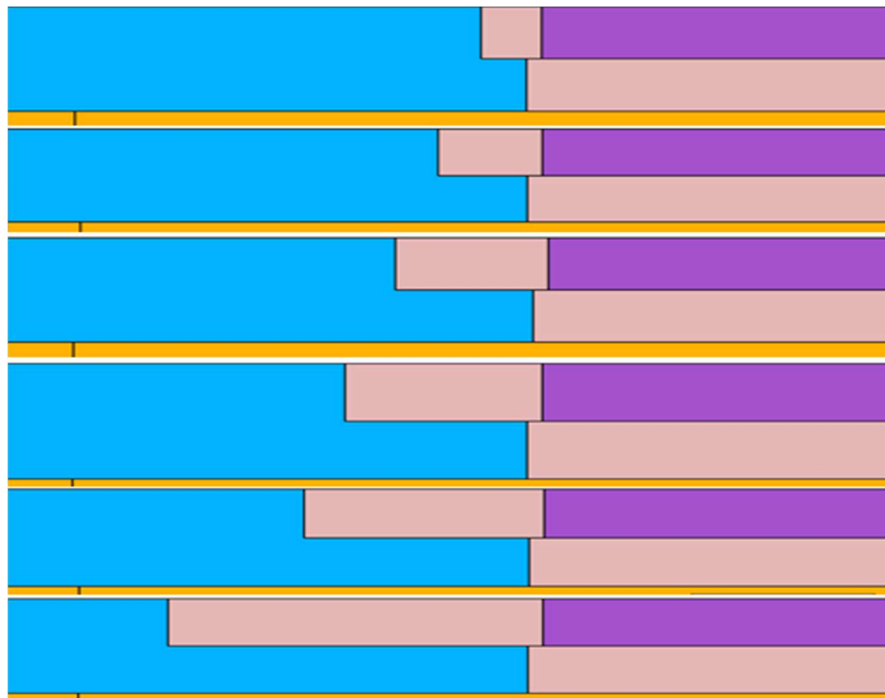


Figure 3.15 Les différentes largeurs de la laque de champ

3.4.2 L'épaisseur d'oxyde :

En utilisant la technique de la plaque de champ comme terminaison avec des composants planaires à haute tension nous avons travaillé avec une épaisseur de $0.6\mu\text{m}$ ($0.3\mu\text{m}$ pour le pixel et $0.3\mu\text{m}$ pour le débordement).

3.4.3 Gap 10

Dans cette structure, nous avons pris une valeur de $10\mu\text{m}$ pour le gap, l'épaisseur de l'oxyde est de $0.3\mu\text{m}$ et la charge dans l'oxyde est de $10+11\text{ cm}^{-2}$, et nous avons fait varier le débordement de la plaque de champ sur le pixel. Les différentes longueurs de cette dernière sont : $3\mu\text{m}$, $6\mu\text{m}$ et $9\mu\text{m}$.

La figure (3.16) représente les caractéristiques courant-tension (I-V) pour différentes longueurs de la plaque de champ. On remarque que la tension de claquage augmente avec l'augmentation du courant de fuite jusqu'à l'arriver à une valeur égale à $3\mu\text{m}$ de largeur de la plaque de champ. Après cette valeur ci, la tension de claquage diminue même si on augmente les valeurs de cette dernière.

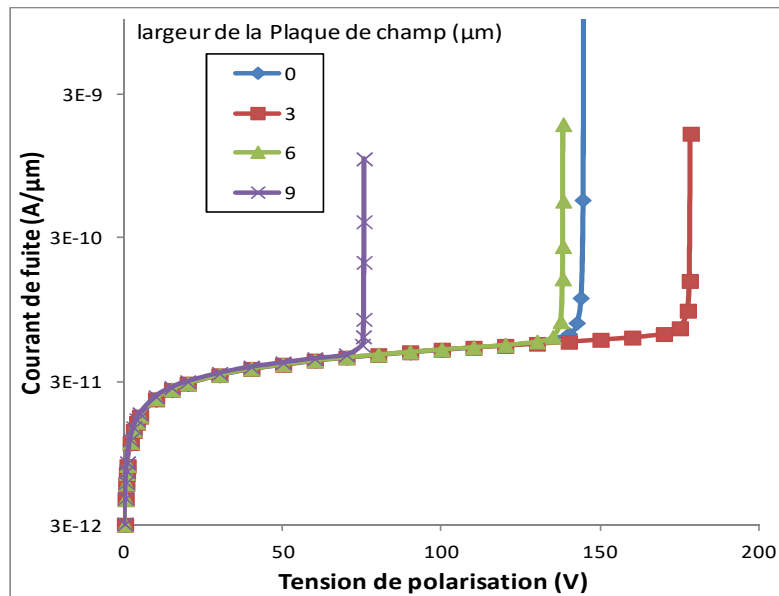


Figure 3.16 Caractéristiques courant-tension pour un détecteur avec différentes longueurs de plaques de champ.

La figure (3.17) montre la variation de la valeur de tension de claquage en termes de la longueur de la plaque de champ. On remarque que le pic de tension est marqué pour une largeur de plaque de champ de $3\mu\text{m}$ après ça commence à se diminuer avec l'augmentation de la largeur. Donc pour un meilleur résultat il suffit d'ajouter à notre pixel un débordement de $3\mu\text{m}$.

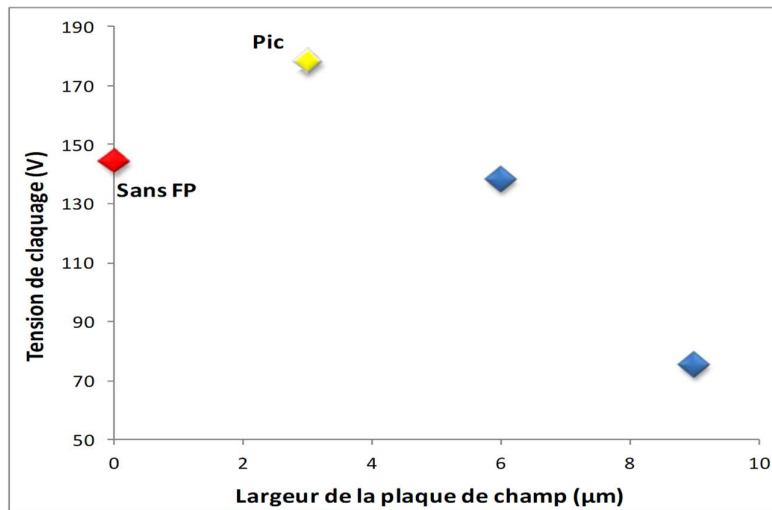


Figure 3.17 Changements de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ.

La figure (3.18) représente la variation de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ pour différentes valeurs d'épaisseur d'oxyde on remarque que pour des valeurs d'épaisseur d'oxyde égales à $0.2\mu\text{m}$, $0.3\mu\text{m}$ et $0.5\mu\text{m}$ le pic de tension est marqué pour une longueur de plaque de champ qui égale à $3\mu\text{m}$ après à chaque fois l'épaisseur augmente ($0.7\mu\text{m}$, $1\mu\text{m}$) le pique de tension change avec.

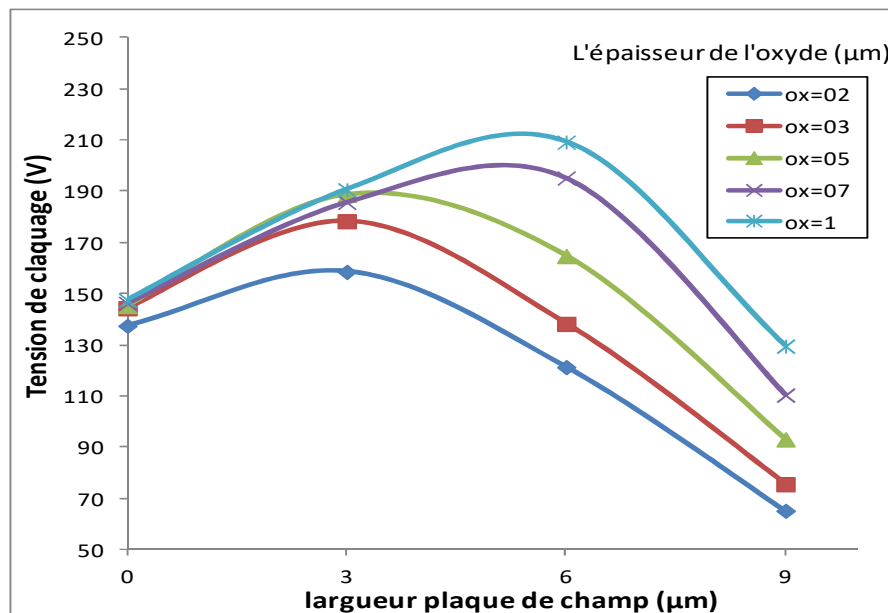


Figure 3.18 Variation de la tension de claquage en fonction de la longueur de la plaque de champ pour différentes valeurs d'épaisseur d'oxyde.

La figure (3.19) on voit le changement de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champs sans charge et avec charge.

On remarque que la tension de claquage diminue si la charge dans l'oxyde augmente, par contre si en travaille sans charge la tension de claquage sera optimale.

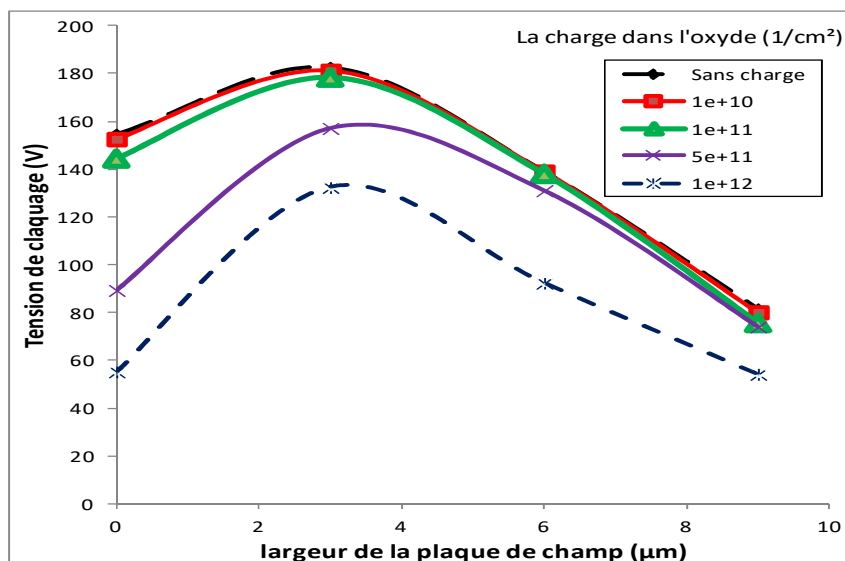


Figure 3.19 Variation de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ pour différentes valeurs de charge dans l'oxyde.

3.4.4 Gap 20 :

Dans cette structure, nous avons pris une valeur de 20 μm pour le gap, l'épaisseur de l'oxyde est de 0.3 μm et la charge dans l'oxyde est de 10^{+11} cm^{-2} .

Nous avons fait varier le débordement de la plaque de champ sur le pixel, les différentes largeurs de la plaque de champ sont : 3 μm, 6 μm, 9 μm, 12 μm et 15 μm.

La figure (3.20) représente les caractéristiques courant-tension (I-V) pour différentes largeurs de la plaque de champ.

On remarque que la tension augmente en valeur absolue avec l'augmentation du courant de fuite jusqu'à l'arriver à la tension de claquage.

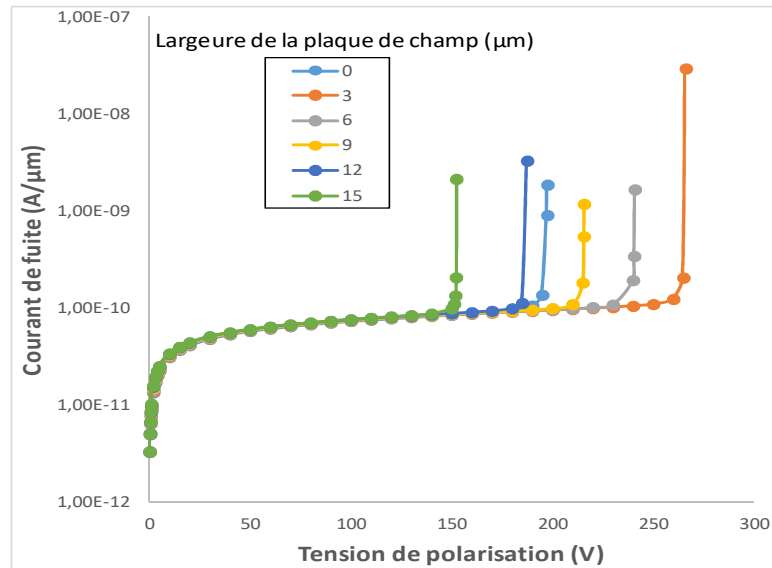


Figure 3.20 Caractéristiques courant-tension pour un détecteur avec différentes largeurs de plaques de champ.

La figure (3.21) montre le changement de la tension de claquage en termes de la longueur de la plaque de champ.

On remarque que le pic de tension est marqué pour une largeur d'une plaque de champ de 3 μm et on voit que la tension de claquage commence à se diminuer avec l'augmentation de cette dernière.

Donc pour un meilleur résultat il suffit d'ajouté au pixel un débordement de 3 μm .

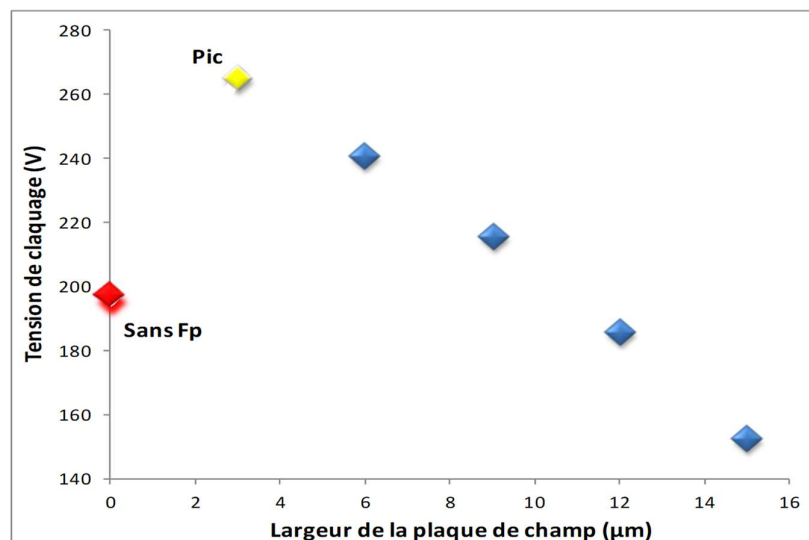


Figure 3.21 Changement de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ.

La figure (3.22) représente la variation de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ pour différentes valeurs d'épaisseur d'oxyde.

On remarque que pour des valeurs d'épaisseur d'oxyde égales à $0.2\mu\text{m}$, $0.3\mu\text{m}$ et $0.5\mu\text{m}$ la tension de claquage est marquée pour une largeur de plaque de champ égale à $3\mu\text{m}$. Par contre, si l'épaisseur de l'oxyde augmente ($0.7\mu\text{m}$ - $1\mu\text{m}$) la tension de claquage aussi augmente avec une condition croissante de la largeur de la plaque de champ.

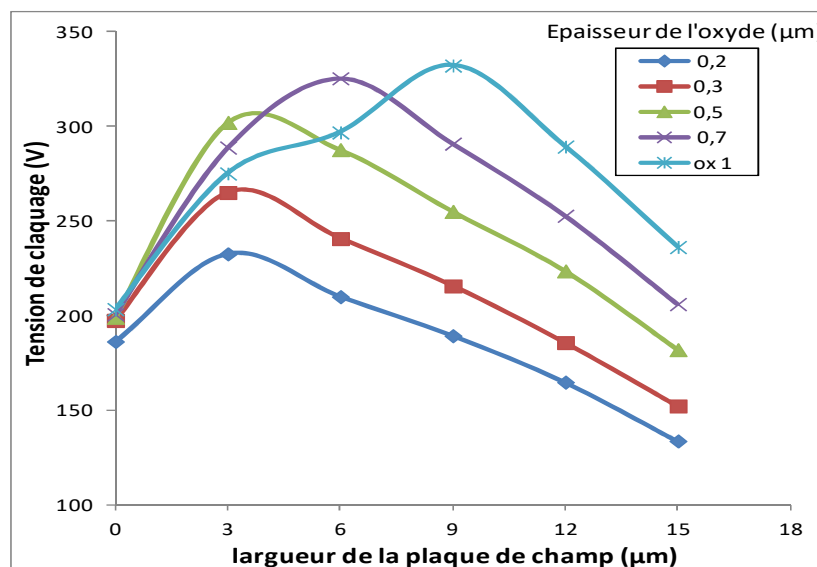


Figure 3.22 La Variation de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ pour différentes valeurs d'épaisseur d'oxyde.

3.4.5 Gap 30

La valeur du Gap prise est égale à $30\mu\text{m}$, l'épaisseur de l'oxyde est de $0.3\mu\text{m}$ et la charge dans l'oxyde est de 10^{+11} cm^{-2} .

Le débordement de la plaque de champ sur le pixel est donné par les valeurs : $3\mu\text{m}$, $6\mu\text{m}$, $9\mu\text{m}$, $12\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$ et $24\mu\text{m}$.

La figure (3.23) représente la variation du courant de fuite en fonction de la tension (V), pour différentes largeurs de la plaque de champ.

On remarque que la tension augmente avec l'augmentation du courant de fuite. Pour une valeur égale à $3\mu\text{m}$ de la largeur de la plaque de champ. Si on augmente la valeur de ce derrière, la tension de claquage diminue.

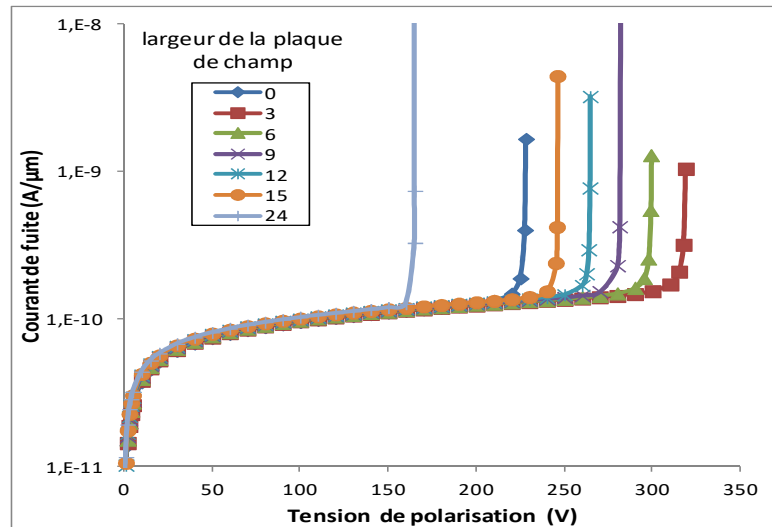


Figure 3.23 Caractéristiques courant-tension pour un détecteur avec différentes longueurs de plaques de champ.

La figure (3.24) montre le changement de la tension de claquage en termes de la largeur de la plaque de champ.

On remarque que le pic de tension est marqué pour une largeur de la plaque de champ de 30μm.

Une fois que la tension de claquage a atteint un seuil de 320 V, une diminution fut aperçue avec une augmentation de la largeur de la plaque de champ. Donc l'utilisation d'une largeur de plaque de champ de 30μm nous a donné un meilleur résultat.

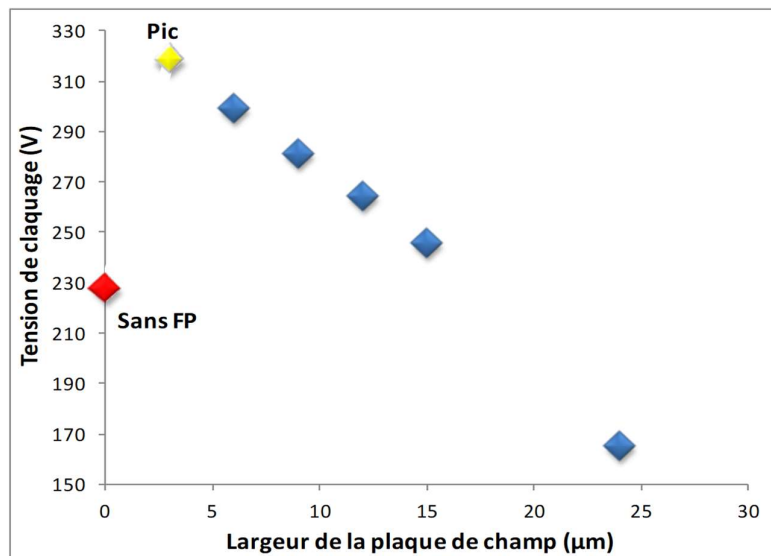


Figure 3.24 Variation de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ.

La figure (3.25) représente la variation de la tension de claquage en fonction de la longueur de la plaque de champ pour différentes valeurs d'épaisseur d'oxyde.

On remarque que pour des valeurs d'épaisseur d'oxyde égales à $0.2\mu\text{m}$, $0.3\mu\text{m}$ et $0.5\mu\text{m}$ la tension de claquage est marquée pour une largeur de plaque de champ égale à $3\mu\text{m}$. Par contre, si l'épaisseur de l'oxyde augmente ($0.7\mu\text{m}$ - $1\mu\text{m}$) la tension de claquage aussi augmente avec une condition croissante de la largeur de la plaque de champ.

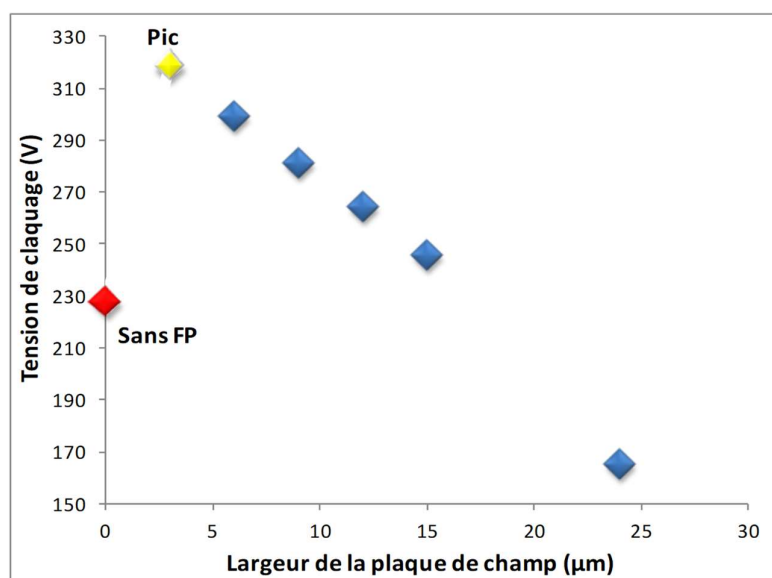


Figure 3.25 Variation de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ pour différentes valeurs d'épaisseur d'oxyde.

La figure (3.26) représente la variation de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ pour des différents valeurs de la charge dans l'oxyde ($1/\text{cm}^3$).

On remarque que si la charge dans l'oxyde augmente, la tension de claquage diminue en fonction de la largeur de la plaque de champ.

Une autre remarque est mise en point, la meilleure charge dans l'oxyde est de $10^{10}(1/\text{cm}^3)$, car le matériau est plus fonctionnel pour la fabrication.

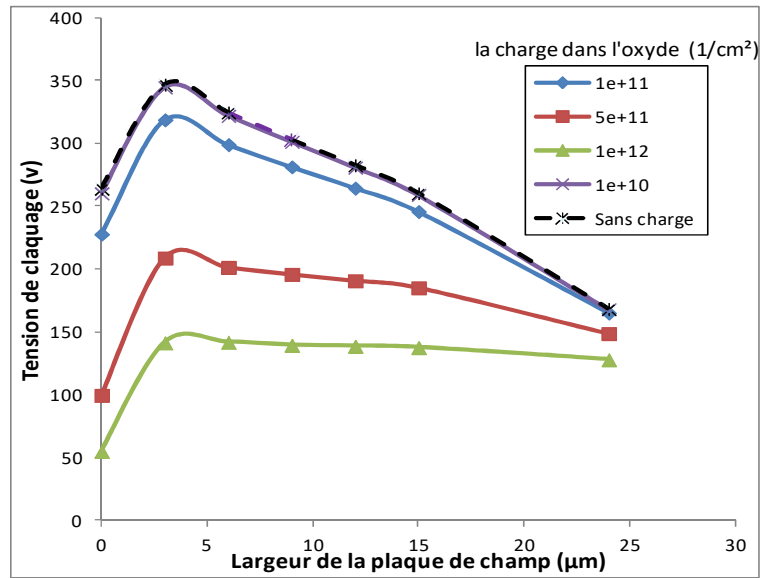


Figure 3.26 La variation de la tension de claquage en fonction de la largeur de la plaque de champ pour différentes valeurs de charge dans l'oxyde.

3.5 Etude Comparative

3.5.1 Comparaison entre les trois Gap

La figure (3.27) représente la comparaison de la tension de claquage en fonction de la largeur des trois gap (10,20,30) μm de la structure sans terminaison.

On remarque que la valeur de la tension de claquage est optimale pour le gap 30 μm.

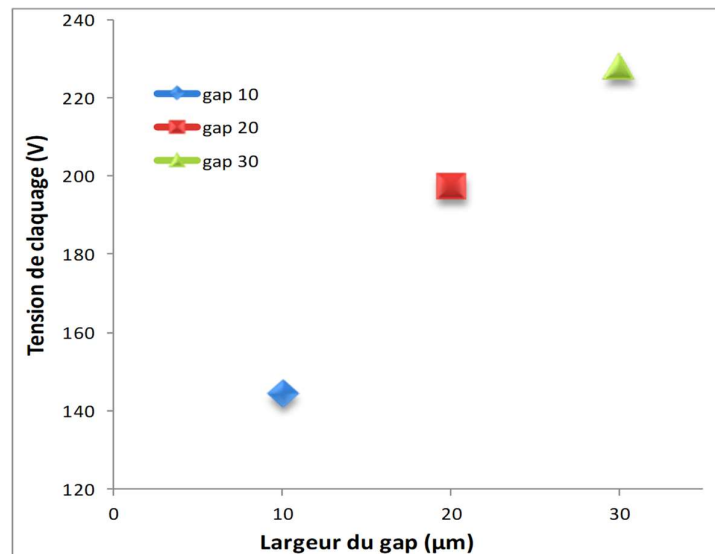


Figure 3.27 Comparaison de la tension de claquage en fonction de la largeur des trois Gap pour une Structure sans terminaison.

3.5.2 Comparaison entre la structure avec anneau de garde et celle avec plaque de champ.

La figure (3.28(a)) représente la variation de la tensions de claquage en fonction de de la largeur de la plaque de champ (la courbe de la plaque de champ) et aussi la variation de la tension de claquage en fonction de la distance entre le pixel et l’anneau de garde (la courbe de l’anneau de garde) en comparant les résultats des deux techniques.

On remarque que la technique la plus performante et celle de la plaque de champ.

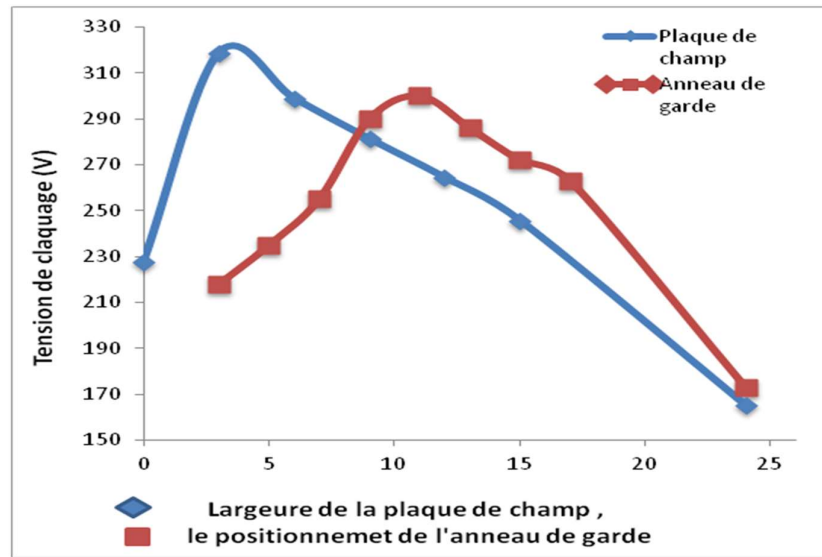


Figure 3.28 (a) : la comparaison de la tension de claquage pour les deux techniques de garde (plaque de champ et l’ajout de l’anneau de garde).

La figure (3.28 (b)) représente la variation des valeurs de courant de fuite en fonction de la largeur de la plaque de champ (la courbe de la plaque de champ) et aussi la variation de courant de fuite en fonction de la distance entre le pixel et l’anneau de garde (la courbe de l’anneau de garde) en comparant les résultats des deux techniques.

On remarque que le courant de fuite dans la technique de plaque de champ est plus élevé que dans celle de l’anneau de garde, dans ce cas l’utilisation de l’anneau de garde est plus recommander.

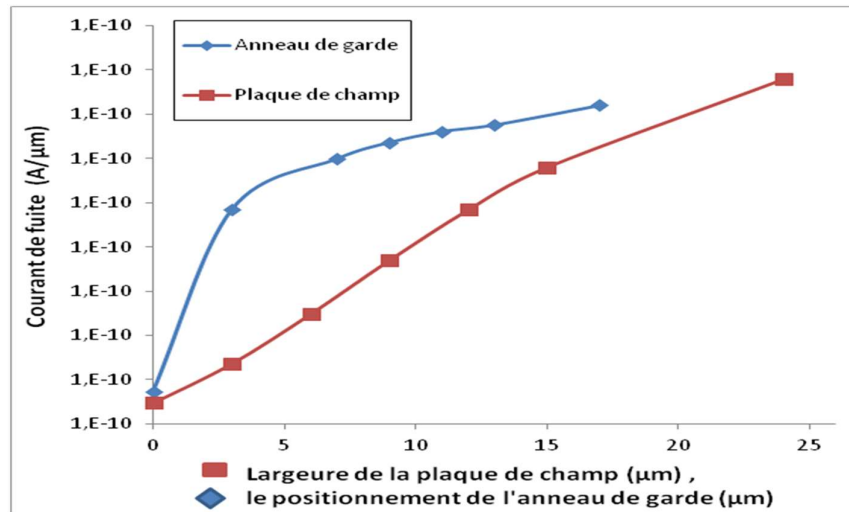


Figure 3.28 (b) la comparaison des valeurs de courant de fuite entre les deux techniques de garde (plaque de champ et l'anneau de garde).

3.6 Conclusion

Pour conclure, dans ce chapitre nous avons touché ; en premier lieu la technique de l'anneau de garde en prouvant que le Gap 30 est le meilleur à utiliser et qui donne de net résultats en utilisant une valeur de 0.3 d'épaisseur dans l'oxyde.

En deuxième lieu, on a vu que la technique de plaque de champ nous a aussi donner des meilleurs résultats pour les mêmes paramètres de conception.

Conclusion générale

Le travail effectué dans le projet de fin d'étude porte sur l'influence des deux techniques de terminaison « les différents cas de positionnement d'un anneau de garde et l'ajout des Plaques de champs » sur un détecteur de particules à semi-conducteurs à bord actif ainsi que les performances électriques extraites pour chaque cas.

Cette étude a été effectuée à l'aide des outils de simulation technologique TCAD de SILVACO ou nous avons exploité un de ses outils qui est ATLAS.

Des défauts structuraux sont créés lors de la détection à cause de l'accumulation des charges dans l'oxyde de silicium et qu'elles ont des effets indésirables qui dégradent les performances du détecteur, principalement le courant de fuite , pour ce la nous avons donné un aperçu des résultats de la simulation afin de montrer comment certains paramètres de la conception des détecteurs critiques ont été choisis donc pour chaque structure nous avons évalué les performances électriques du détecteur à travers le courant de fuite et la tension de claquage .

Dans un premier temps, nous avons déterminer la position optimum de l'anneau de garde qui permet d'obtenir la tension de claquage la plus élevée. Par la suite sur la même structure nous avons appliqués la technique de plaques de champs permettant d'appliquer des tensions plus élevées.

La connaissance et la maitrise des procédés technologiques en microélectronique et à la physique des hautes énergies 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] F. LAGARDE « Caractérisation de détecteur a plaques résistives de verres de basse résistivité en vue de la mise à niveau de CMS » Thèse de doctorat 2017, Université Claude Bernard Lyon1.200P
- [3] HAMMICHE.Y, MAZOUZ.A « Étude de l'effet du type de la couche d'isolation sur un détecteur de particule à l'aide des outils de simulation TCAD-SILVACO » Mémoire de fin d'étude2017-2018, Université de Blida1, 71P
- [4] Abdellatif NACHAB « Études expérimentales et modélisations Monte Carlo de l'auto-absorption gamma et de la dosimétrie active par capteurs CMOS » Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur. Strasbourg I, et Université Chouaib Doukkali El Jadida Maroc (2003).
- [5] Fedia BACCAR EL BOUBKARI « Évaluation des mécanismes de défaillance et de la fiabilité d'une nouvelle terminaison haute tension approche expérimentale et modélisation associée » Thèse de doctorat UNIVERSITÉ DE BORDEAUX. (2015).
- [6] F. BOUROUBA « Modélisation et simulation des contacts métal-semi-conducteur à barrière inhomogène » mémoire de magister en électronique Université FERHAT ABBAS-SETIF, 2010
- [7] H. Mathieu « Physique des semi-conducteurs et des composants électroniques » Dunod, 6^{ème} édition2009, Paris.853P
- [8] CHOVET. A, MASSON. P « Physique des semi-conducteurs » École polytechnique université de PROVENCE (Marseille), 1 Février 2018
- [9] N. SERVAGENT « Physique des semi-conducteurs : Fondamentaux » École des mines de Nantes. Avril 2008.
- [10] CHANTEPIE. B « Étude et réalisation d'une électronique rapide a base bruit pour un détecteur de rayons X a pixel hybrides destiné à l'imagerie du petit animal » Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée – Aix-Marseille 2. 2008
- [11] DRIOUECH.Y, ABDELHAMID.A « Étude des effets des radiations sur un détecteur de particules de type 3D à l'aide des outils TCAD-SILVACO » Mémoire de Projet de fin d'étude, Université de Blida1, 71P

- [12] N. SERVAGENT « Capteurs à semi-conducteurs et applications Physique des semi-conducteurs Fondamentaux » École des Mines de Nantes.2007
- [13] N. AGUMMOUME « Étude de l'influence des anneaux de garde sur les performances d'un dispositif semi-conducteur de type diode a jonction P-N » Mémoire de fin d'étude (2014-2015), Université de Blida1, 66P
- [14] TERGHINI Ouarda « Simulation numérique des effets de radiation dans les détecteurs de particules à base de silicium de type p » Thèse de doctorat 2015, Université Mohamed Khider Biskra.107P
- [15] Casse Gianluigi « The effect of hadron irradiation on the electrical properties of particle detectors made from various silicon materials » Thèse PhD1998, University of Grenoble 1
- [16] Celine Lebel, 2007« Effets de rayonnement sur les détecteurs au silicium à pixels du détecteur ATLAS » Thèse doctorat Université de Montréal.129P
- [17] M.Hamrita. « Réponse en courant des détecteurs silicium aux particules chargées et aux ions lourds » Thèse de doctorat. Université de paris.2005
- [18] L. Rossi, P. Fisher, T. Rohe, and N. Wermes « Pixel detectors : from fundamentals to applications » Springer-Verlag 2006.304P
- [19] M. POVOLI, A. BAGOLINI « Development of planar detectors with active edge » Rvue 2011.5P
- [20] « Sylvain Noblecourt Conception et réalisation de composants de puissance à superjonction et à tranchées profondes pour des applications 600 V et 1200 V Électronique » Université Paul Sabatier - Toulouse III. (2016-2017), 150P.
- [23] C. MINGUES « Modélisation et réalisation de terminaison de jonctions haute tension compatible avec la technologie planar : les anneaux polarisés et la spirale de sipos » Thèse de doctorat 1997, Université Paul Sabatier de toulouse.163P
- [24] ATLAS User's manual Silvaco International inc Device Simulation Software, Juin 2012.
- [25] KAGHOUCHE Bessem « Etude par TCAD-SILVACO d'une structure MOS pour la réalisation de capteurs ISFET : paramètres technologiques et électriques » Magister en électronique 2010, Université Mentouri -Constantine.99p
- [26] Patrick Henry Drive « ATLAS User's Manuel », December7, 2006.

[27] Patrick Henry Drive « ATLAS User's Manuel », September3, 2010.