

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE
N° : ME 13/2019



DOMAINE : ELECTRONIQUE
FILIERE : ELECTRONIQUE
OPTION MECRO ELECTRONIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: Drissi Rezki et Louifi Ayyoub

Intitulé

Étude et simulation numérique des
performances d'un détecteur à avalanche à
faible gain

Soutenu devant le jury composé de:

Dr. Zouache Tarek	Université de M'sila	Président
Dr. Bendib Toufik	Université de M'sila	Rapporteur
Dr. Saada Khalkhal Fayçal	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2018 /2019



Remerciemen

*Nous remercions ALLAH le tout puissant de nous donner
La volonté et le courage pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous remercions notre encadreur Dr. **Bendib Toufik**, enseignant à
l'université de Mohamed BOUBIAF M'sila, pour nos avoir encadre,
pour nos avoir guide et encouragé dans ce travail, pour tous les
connaissances scientifiques et les conseils qu'il nous a apport.*

*Nous exprimons toute notre gratitude à nos parents pour leur
encouragement, la confiance et le soutien morale dont ils ont fait
preuve tout ou long de ces années de études.*

*Nous somme très reconnaissant aux membres du jury, qui ont bien
l'honneur d'examiner ce modeste travail.*

*Enfin, mes remerciements s'adressent à tous ceux qui ont participé
de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

Dédicace

***Louange à Allah et prières et paix soient sur le Messager
d'Allah.***

Je dédie ce modeste travail à :

***Ma très chère mère qui m'a soutenue durant toute ma
vie.***

À celui qui me doit crédit à mon père.

À ma grand-mère, que Allah prolonge sa vie.

À mes frères et mes sœurs.

À toute ma famille.

A mon encadreur Dr. BENDIB Toufik.

À tous les étudiants de M'sila.

ayyoub

Résumé

Dans ce de travail, nous allons étudier les différentes structures des photodiodes à avalanche numériquement et modéliser leurs caractéristiques électriques tel que le potentiel, le champ électrique et la tension de claquage afin d'améliorer leurs performances. En effet, des simulations numériques seront effectuées pour décrire le comportement électrique des photodiodes à avalanche notamment : le gain, le facteur de bruit et la tension de claquage ainsi la variation de la tension de claquage avec la température. Ce qui permet au designer l'obtention des résultats en terme de performance et d'adresser les problématiques relatives aux domaines d'application.

Summary

In this work, we will study the different structures of avalanche photodiodes numerically and model their electrical characteristics such as potential, the electric field and the breakdown voltage to improve their performance. Indeed, numerical simulations will be performed to describe the electrical behavior of avalanche photodiodes including: gain, the noise factor and the breakdown voltage, thus, the variation of breakdown voltage with temperature. This, allows the designer to obtain the results in term of performance and to address the problems relating to the fields of application.

ملخص

في هذا العمل ، سوف ندرس الهياكل المختلفة للثنائيات الكهروضوئية ذات الانهيار رقميا ونقوم بنمذجة خصائصها الكهربائية مثل فرق الكمون و الحقل الكهربائي و جهد الانهيار لتحسين أدائه . في الواقع ، سيتم إجراء المحاكاة الرقمية لوصف السلوك الكهربائي للثنائيات الكهروضوئية ذات الانهيار ، بما في ذلك: عامل الكسب، عامل الضوضاء و جهد الانهيار الجهد و تغير جهد الانهيار مع درجة الحرارة ، مما يسمح للمصمم بالحصول على نتائج الأداء واستكشاف مشكلات مجال التطبيق.

Sommaire

Introduction générale-----01

CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES PHOTODIODES A AVALANCHE

I.1.Introduction -----03

I.2. Définition d'une photodiode -----03

I.3.Jonction PN -----04

I.3.1 Définition de la jonction PN -----04

I.3.2 Etude de la jonction PN -----04

I.3.3 Région N -----04

I.3.4 Région *P*-----04

I.3.5 Phénomène de diffusion-----05

I.3.6 Phénomène de recombinaison -----05

I.4- Principe de fonctionnement des photodiodes-----06

I.5 Caractéristiques électriques -----09

I.4.1. Résistance shunt, R_{SH} -----09

I.4.2. Résistance série, R_S -----09

I.4.3. Capacité de jonction, C_J -----10

I.6. Structure dérivées -----10

I.6.1 Photodiode P-I-N -----10

I.6.2	Densité de la charge et la champ électrique	11
I.6.3	Largeur de la région d'épuisemen (W)	12
I.6.4	Matériau utilisés	12
I.6.5	Photodiode PIN est rapide	12
I.7	Photodiode Schottky	13
I.7.1	Certains avantages des les photodiodes Schottky	13
I.7.2	Application de la photodiode Schottky	14
I.8	Photodiode à hétérojonction	14
I.9	Photodiode à cavité résonante	14
I.10	Photodiode UTC	15
I .10.1.	Principe fonctionnement d'une photodiode UTC	16
I.11	Photodiode à avalanche APD	17
I.11.1	Structures la photodiode à avalanche (APD)	18
I. 11.2.	Comparaison entre les PIN et PDA	19
I.11.3	Principe du fonctionnement de la photodiode DPA	20
I.11.4	Décomposition en d'avalanche	21
I.11.5	Ionisation par impact	21
I.11.7	Gain	22
I.11.8	Avantage de la photodiode à avalanche	23
I.11.9	Inconvénients de la photodiode à avalanche	23

I.11.10 Application photodiode -----	23
I.12.Conclusion -----	23
 CHAPITRE II : Initiation à l'outil de simulation (SILVACO-ATLAS)	
II.1. Introduction-----	24
II.2. SILVACO-----	24
II.3. Silvaco TCAD Simulation Modules -----	26
II.3.1. ATHENA-----	26
II. 3.2.SPDB (Process Data Base) -----	27
II. 3.3. Atlas -----	27
II. 3.3.1 DECKBUILD -----	27
II. 3.3.2 TONYPLOT -----	27
II. 3.3.3DEVEDIT-----	27
II. 3.3.4 Mask Views-----	27
II. 3.4. SSuprem3-----	27
II. 3.5. Mercury -----	28
II. 3.6.Mocasim -----	28
II. 3.7. Optimiseur-----	28
II. 4. Rôle de la simulation-----	28
II. 4.1. Simulation des composants semi-conducteurs (Quel est le besoin ?) -----	28
II. 5. Bases physiques du principe de fonctionnement du simulateur TCAD-SILVACO -----	29

II. 5 .1. Equations de bases de la physique des semi-conducteurs -----	29
II. 5 .1.1.L'équationdePoisson -----	29
II. 5 .1.2. L'équation de continuité -----	30
II. 5 .1.3. Modèle de mobilité -----	30
II. 5 .1.4. Équations constitutives -----	31
II. 6. Modèles physiques utilisés-----	32
II. 6.1. Modèles de recombinaison de génération de porteurs -----	32
II. 6.2. MODÈLES D'IONISATION IMPACT -----	32
II. 7. ATLAS-----	33
II. 7.1. Entrées et sorties d'Atlas -----	34
II. 7.2. DeckBuild -----	35
II. 7.2.1. Définition du programme de simulation dans DECKBUILD---	36
II. 7.2.2. Lancer Atlas dans Deckbuild -----	38
II. 7.3. Tony Plot -----	38
II. 8. Déclarations et paramètres-----	39
II. 8.1. Spécification de la structure -----	40
II. 8.1.1. Électrodes-----	40
II. 8.1.2. Spécification maillage -----	41
II. 8.1.3. Spécification de Dopage -----	43
II. 9. Spécifications des modèles et matériels -----	44

II. 9.1. Spécification du matériel -----	44
II. 9.2. Spécification du modèle -----	44
II. 9.3. Spécification du contact -----	44
II. 9.4. Spécification de solution -----	44
II.10. Sélection de la méthode numérique -----	44
II.11. Conclusion-----	45
CHAPITRE III : SIMULASION NUMERIQUE DE LA PHOTODIODE A	
AVALANCHE A FAIBLE GAIN	
III.1. Introduction -----	46
III.2 Description de la structure étudiée -----	46
III.2.1 Profile de dopage -----	47
III.3.2 Champ électrique et profile de potentiel -----	48
III.2.3 Caractéristique I-V -----	49
III.3 Validation du modèle numérique -----	50
III.4 Influence de la température sur le gain de multiplication et facteur de bruit-----	52
III.4.1 Influence de température sur le gain de multiplication -----	52
III.4.2 Influence de température sur le facteur de bruit -----	54
III.4.3 Sensibilité du gain de multiplication à la température -----	55
III.4.4 Sensibilité du facteur de bruit à la température -----	56
III.5.Influence de dopage -----	57

III.5.1. Influence de dopage sur le gain de multiplication -----	58
III.5.2. Influence de dopage sur le facteur de bruit -----	59
III.5.3. Influence de dopage sur les caractéristiques électriques -----	60
III.5.3.1. Influence de dopage sur le champ électrique-----	60
III.5.3.2. Influence de dopage sur LA TENSION D'AVALENCHE dans la région de multiplication-----	62
III.6 CONCLUSION -----	63
III.7 Conclusion générale-----	64

Liste de Figure

CHAPITRE I :

Figure I.1 : symbole de photodiode-----	04
Figure I.2 : Photodiode-----	04
Figure I.3 : Principe de jonction PN -----	06
Figure I.4 : Structure d'une photodiode. -----	07
Figure I.5: Jonction PN sous polarisation inverse et soumise à un rayonnement. -----	07
Figure I.6 : Génération de porteurs par absorption de lumière dans les différentes zones de la diode -----	08
Figure I.7 : Circuit équivalent pour la photodiode au silicium-----	09
Figure I.8 : Photodiode PIN en polarisation 10-----	11
Figure I.9 : Largeur de la région d'épuisement. -----	12
Figure I.10 : Structure d'une photodiode `a cavité résonante SiGe – Si, d'après-----	15
Figure I.11 : Principe de fonctionnement d'une photodiode UTC-----	17
Figure I.12 : Photodiode APD. -----	18
Figure I.13: Structure de "pénétration" utilisée par photodiode PDA. -----	19
Figure I.14: Structure d'une photodiode à avalanche-----	20
Figure15 : Effet d'avalanche. -----	21
Figure I.16 : Représentation de la zone de multiplication pour la détermination du gain-----	23

CHAPITRE II :

Figure II.1 : Suite d'outils TCAD de SILVACO -----	26
Figure II.2 : Rôle de simulation-----	28
Figure II.3 : Modèle de transport d'Équations constitutives-----	31

Figure II.4 : Exemple de simulation par ATLAS (caractéristique de courant –tension) --	-----34
Figure II.5 : Entrées et sorties d’Atlas-----	-----35
Figure II.6 : Interface de DeckBuild-----	-----36
Figure II.7 : Lancer Atlas dans Deckbuild-----	-----38
Figure II.8 : Fenêtre de Tony Plot -----	-----39
Figure II.9 Electrode d’une photodiode à avalanche -----	-----41
Figure II.10 : Maillage d’une photodiode d’avalanche-----	-----42
Figure II.11 : Dopage d’une photodiode d’avalanche-----	-----43
Figure II.12 : Méthodes numériques-----	-----45
 CHAPITRE III :	
Figure III.1 Structure d’une photodiode à avalanche-----	-----46
Figure III.2 : Champ électrique et profile de potentiel -----	-----47
Figure III.3 : Répartition du champ électrique dans la photodiode à avalanche -----	-----48
Figure III.4 : Profile de potentiel dans la photodiode à avalanche -----	-----49
Figure III.5 : Caractéristique I-V de la photodiode à avalanche -----	-----50
Figure III.6 Simulation Silvaco (a) Pic du champ électrique (b) tension de claquage -----	-----51
Figure III.7 Simulation en Matlab : gain de multiplication en fonction de la tension de polarisation inverse pour différents températures [293 ° K, 300 ° K, 303 ° K] -----	-----54
Figure III.8 Simulation en Matlab facteur de bruit en fonction de la tension de polarisation inverse pour différents températures [293 ° K, 300 ° K, 303 ° K] -----	-----55

Figure III.9 : simulation en Matlab pour Gain en fonction de la température pour des PDA avec différentes doses de Bore dans la couche de multiplication -----	56
Figure III.10 : Simulation en Matlab : Facteur de bruit en fonction de la température pour des APDs avec différentes doses de Bore dans la couche de multiplication -----	57
Figure III.11 : Simulation en Silvaco : Profile du dopage du Bore (10^{13} cm^{-2} - $1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$) ---	58
Figure 12: simulation en Matlab pour le Gain de multiplication en fonction de la tension de polarisation inverse pour des doses de bore différentes [$1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ à $1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$] de la couche de multiplication -----	59
Figure III.13 : le facteur de bruit en fonction de la tension de polarisation inverse pour des doses de Bore différentes [$1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ à $1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$] de la couche de multiplication -----	60
Figure III.14: simulé en Silvaco pour Champ électrique simulé dans la région de multiplication pour différents doses de bore, $L = 100 \mu\text{m}$, $V_{\text{pol}}=500\text{V}$ -----	61
Figure III.15 : simulation en Silvaco de caractéristique $I(v)$ dans la région de multiplication sous l'effet tension polarisation inverse pour divers doses de bore, $L = 100 \mu\text{m}$ -----	62
Figure III.16 : illustre la variation du facteur de bruit avec dose implant en bore de la région de multiplication obtenu par TCAD-Silvaco et MATLAB basé sur la simulation numérique -----	63

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Quelques constantans physique -----05

Tableau I.2 : Comparaison des caractéristiques de photodiode PIN et PDA -----19

CHAPITRE II

Tableau. II.1: Définition du programme de simulation dans DECKBUILD -----37

Tableau. II.2: Groupes de commandes ATLAS avec les instructions primaires dans chaque groupe -----40

CHAPITRE III

Tableau III.1 : Comparaison des résultats de simulation obtenus par Matlab et Silvaco -----50

Tableau III.2 : Résumé des résultats de simulation en Matlab pour le gain et facteur de bruit dans la région de multiplication pour différents doses de bore et des températures, $L = 100 \mu\text{m}$, $V_{\text{pol}}=500\text{V}$ -----53

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'industrielle de l'électronique a grandi et devenu l'un des plus grand du monde. La demande croissante de petits dispositifs électroniques avec une meilleure performance à moindre coût pousser la technologie à base de silicium classique de ses limites[1].

La photo-détection consiste à la conversion d'un signal optique (photons) en un signal électrique (paires électron-trous). Dans ce mémoire, nous nous limiterons à la photo-détection dans les matériaux semi-conducteurs particulièrement le silicium, mais ce phénomène peut aussi se produire dans un métal, où on parle alors d'émission photo-électrique [2].

En outre, l'utilisation de photo-détecteurs qui ont un rendement quantique interne (gain de multiplication) supérieur à 1, présente un des moyens d'amélioration de la sensibilité des récepteurs optiques. Ce qui signifie qu'un photon absorbé donnera la naissance d'une paire électrons-trous qui sera multipliée par l'effet du champ électrique.

Ces photodiodes, appelées photodiodes à avalanche, ont été étudiées depuis les débuts de la microélectronique et sont déjà utilisées dans des applications de type télécommunication longue distance, où le signal optique à détecter est de faible puissance [3].

Il est cependant nécessaire dans un premier temps d'étudier la physique de ce type de dispositifs, ce qui nous intéresse dans ce travail, et de comprendre l'impact des différents paramètres physiques sur leur fonctionnement. A partir de la compréhension de la physique des dispositifs à avalanche, différentes structures de photodiodes à avalanche en Silicium ont pu être étudiées, notamment les photodiodes qui présentent une des différentes couches de multiplication [4].

L'étude, la simulation ainsi que les résultats de simulation seront présentés pour ce type de photodiode.

L'outil de simulation utilisé dans ce travail est le logiciel TCAD-SILVACO [5]. Ce logiciel permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs à base de semi-conducteur grâce à ses modules de simulation (ATLAS). La simulation du comportement électrique de dispositif, a été réalisée au moyen de l'outil ATLAS.

Dans ce contexte, notre travail consiste à étudier et optimiser les caractéristiques électriques d'un composant optoélectronique, appelé photodiode à avalanche (APDs) afin d'améliorer leurs performances. C'est autour de cet axe que ce mémoire a été mené et sera présenté.

Le premier chapitre présente les généralités sur les photodiodes particulièrement la photodiode à avalanche en présentant leur principe de fonctionnement et leurs caractéristiques électriques.

Le deuxième chapitre présente le logiciel de simulation TACD-SILVACO, et ces modules de simulation ATLAS pour la simulation du comportement électrique des composants optoélectroniques, et comment l'utiliser pour développer des programmes de simulation qui permettant le calcul numérique des caractéristiques courant-tension des photodiodes à avalanche.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude du profil de potentiel, le champ électrique et la caractéristique électrique courant –tension de la photodiode à avalanche. En outre, l'effet du profil de dopage du Bore et la température sur le gain, le facteur de bruit et la tension d'avalanche a été étudié.

CHAPITRE I

Génération sur les
photodiodes à avalanche

❖ I.1.Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter des généralités sur les photodiodes particulièrement les photodiodes à avalanche, résumant, leur définition, leur principe de fonctionnement et leurs caractéristiques électriques telle que: le champ électrique, l'ionisation par impact, énergie de seuil d'ionisation et le gain de multiplication.

❖ I.2.Définition d'une photodiode :

La photodiode est une diode non capselles (sensible à la lumière) génère une tension électrique (effet photovoltaïque) ou un photo-courant lorsqu'elle est éclairée Ce photo courant reste linéaire à la quantité de lumière incidente sur plusieurs ordres de grandeur, mais lorsque il en obscurité il donne seulement un courant de fuite s'appelle le courant d'obscurité .La photodiode sensible à la lumière pour certaine longueur d'onde (longueur d'onde faible ou bien longe) .Lorsque la radiation de la longueur d'onde augment, l'absorption de la lumière croit et aussi la quantité de la paire électron-trou générée près de la surface. Lorsqu'elle est illuminée sous radiation de longueur d'onde suffisamment faible, ce fait création des porteurs de charge (paire électron-trou) Ceux-ci sont séparés et balayés par un champ électrique dans la zone de déplétion .La résulte est un courant électrique proportionnelle à la densité du flux de photons incident. L'état de la diode fonctionnement en tant qu'élément ou en tant que diode dépend du circuit externe .Lorsqu'elle fonctionne en tant qu'élément, la diode est connectée directement au consommateur sans source de tension externe. Avec ce mode de fonctionnement, aucun courant d'obscurité ne circule, ce qui facilite la détection d'intensités minimales. Tant que diode, une source de tension externe est connectée en série avec le consommateur, ou la tension est appliquée en sens inverse. Ce mode de fonctionnement est idéal pour les applications nécessitant une réponse rapide du signal. L'inconvénient majeur est le courant d'obscurité qui augmente de façon exponentielle Avec La Température.

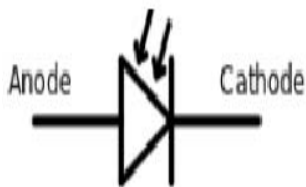


Figure 1 : symbole de photodiode

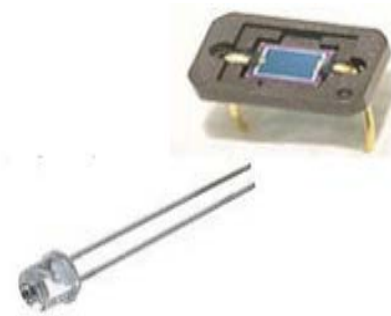


Figure 2 : photodiode

❖ I.3.jonction PN :

✚ I.3.1 Définition de la jonction PN : [6]

On appelle jonction PN l'association d'une zone de semi-conducteur de type P avec une zone de semi-conducteur de type N. La réalisation des jonctions PN peut s'effectuer de différentes façons : alliage, diffusion, implantation...

✚ I.3.2. Etude de la jonction PN :

➤ I.3.2 .1. Région Type N :

Des charges négatives dues aux électrons libérés par les impuretés. Des paires électrons-trous dues aux ruptures des liaisons covalentes. Des ions fixes donneurs (charge +) [7].

➤ I.3.2 .2. Région Type P:

Des charges positives dues aux trous libérés par les impuretés. Des paires électrons-trous dues aux ruptures des liaisons covalentes. Des ions fixes accepteurs (charge -) Après la mise en contact, le système « jonction PN » va tendre naturellement, sous l'action de plusieurs phénomènes, vers un nouvel équilibre [7].

➤ **I.3.2 .3.Phénomène de diffusion :**

Les trous, excédentaires côté P, et les électrons, excédentaires côté N vont tendre à diffuser, respectivement, vers la zone N et la zone P où ils sont minoritaires. Cette diffusion commencera, en priorité, au voisinage immédiat de la transition entre la zone P et la zone N [8].

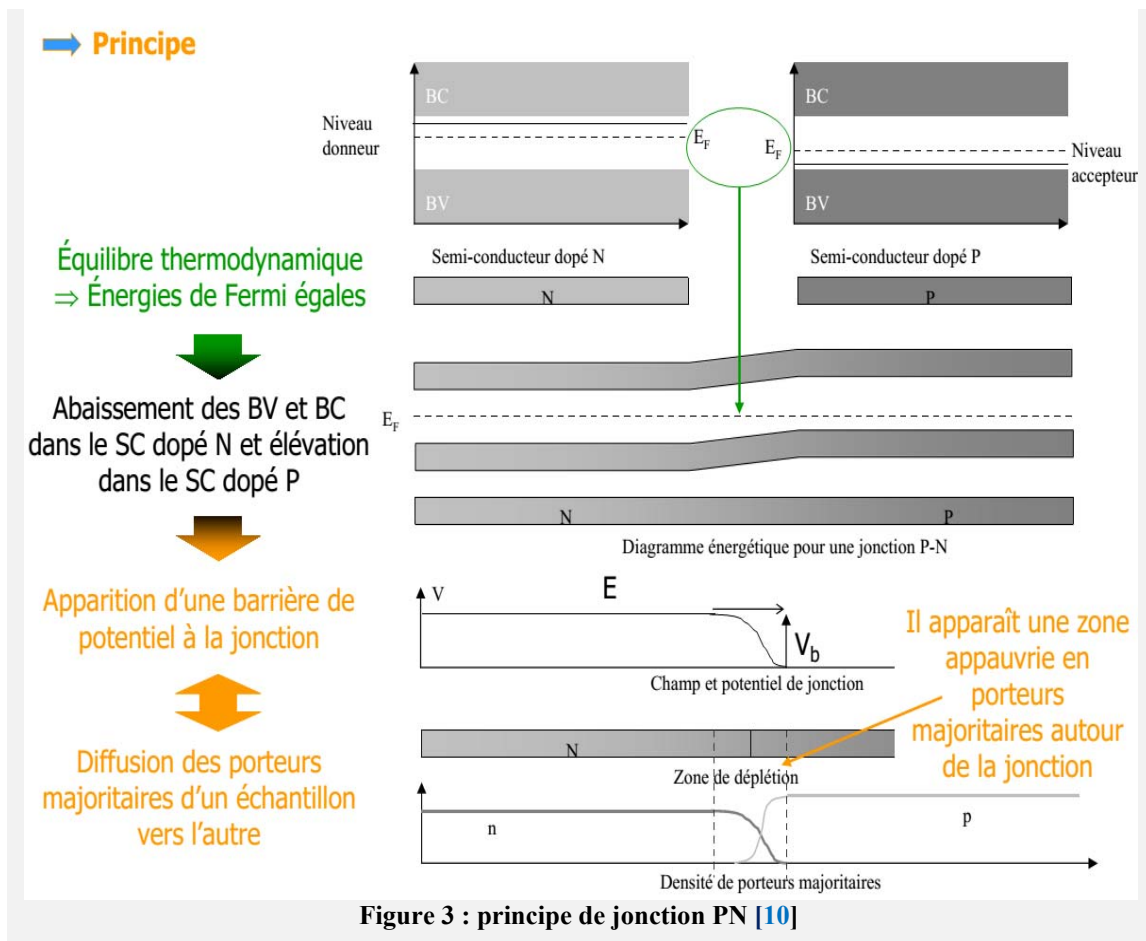
➤ **I.3.2 .4.Phénomène de recombinaison :**

Au voisinage de la jonction et du fait de la diffusion, la probabilité pour que deux charges libres, de signes contraires, se recombinent est importante. Il y a donc, du fait de la recombinaison, appauvrissement en charges libres au voisinage de la jonction où il ne reste donc que des charges fixes [9].

Cette zone est appelée zone de transition ou de déplétion. Le tableau suivant (Tableau 1) rappelle quelques valeurs fréquemment utilisé en microélectronique.

	Si	SiO ₂
Atome ou molécules par (cm³)	5×10²²	2.3×10²²
Largeur de la bande interdite : E_g (ev)	1.1	8
Constant diélectrique : ε_{siO2} (F .cm⁻¹)	1.4×10⁻¹²	0.33×10⁻¹²
Champ électrique provoquant de claquage : E (v.µm⁻¹)	30	600
Point de fusion : T_f (°c)	1416	1700
Indice de réfraction (n)	3.44	1.46

Tableau 1 : Quelques constantes physiques



❖ I.4- Principe de fonctionnement des photodiodes :

À l'origine, la photodiode est une diode qui n'a pas été encapsulée et qui est donc sensible aux radiations extérieures (figure 4). Son principe de fonctionnement est basé sur les mécanismes de conduction dans une jonction PN polarisée en inverse et soumise à un rayonnement (figure 4).

Le principe du photo-détecteur est donc de créer par absorption de photons des porteurs libres dans un semi-conducteur où existe un champ électrique. On peut créer le champ électrique soit simplement en polarisant à travers deux contacts ohmiques (cas du photoconducteur), soit en introduisant une jonction métallurgique qui donne lieu à un processus de diffusion de porteurs créant ainsi une zone déserte où se localise le champ (cas des photodiodes, du MSM et des phototransistors). Les grandeurs qui caractérisent le comportement d'un photo-détecteur sont:

- Le courant d'obscurité.
- Le rendement quantique (nombre de paires créées par photon incident).
- Le gain (lorsqu'il existe).
- La fréquence de coupure.
- La puissance de bruit due au photo-courant et au courant d'obscurité.

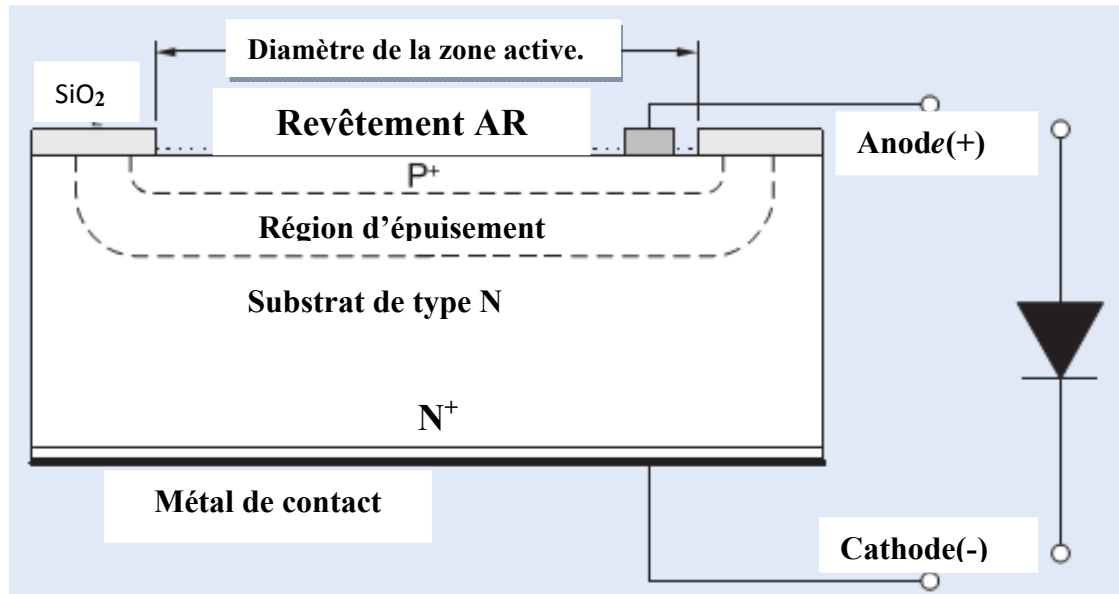


Figure 4 : Structure d'une photodiode [11]

Les porteurs photogénérés sont séparés et accélérés par un champ électrique puis collectés pour contribuer au courant mesuré.

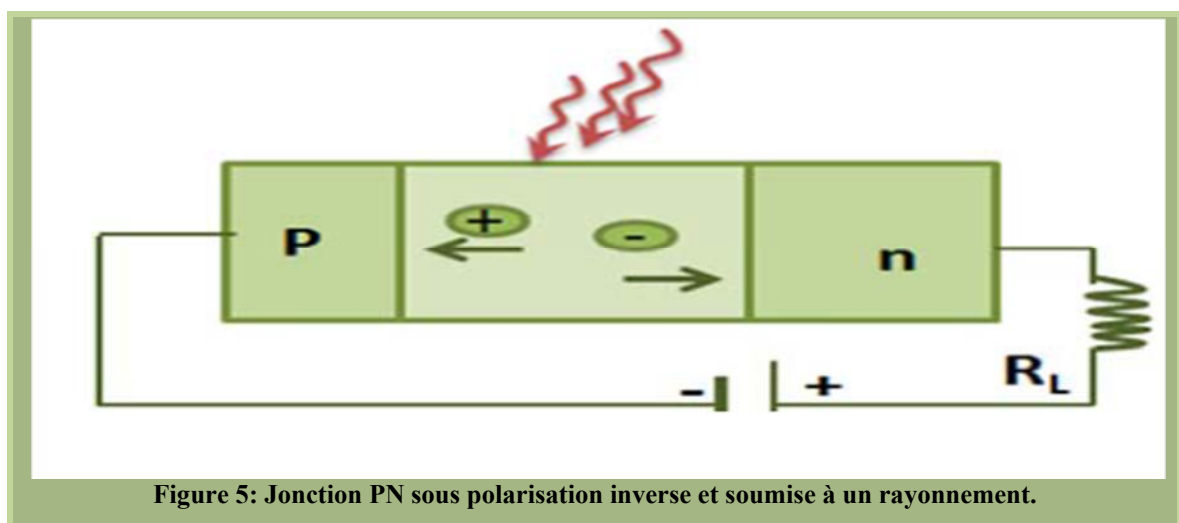


Figure 5: Jonction PN sous polarisation inverse et soumise à un rayonnement.

Le courant qui circule dans une diode est donné par l'expression :

$$I = I_s(e^{V/UT} - 1) \quad (I.1)$$

Où I_s est le courant de saturation, $UT \approx 26$ mV à 300K et V la tension appliquée. Lorsque la diode est polarisée en inverse et pour $|V| \gg UT \Rightarrow I^- \approx I_s$

Le courant mesuré est dû aux porteurs minoritaires des régions P et N et de la génération des paires électron-trou dans la Z.C.E.

Dans le cas de la photodiode, le rayonnement absorbé augmente ce courant par la création des porteurs dans la zone de charge d'espace. Considérons le schéma de la figure 6 suivante :

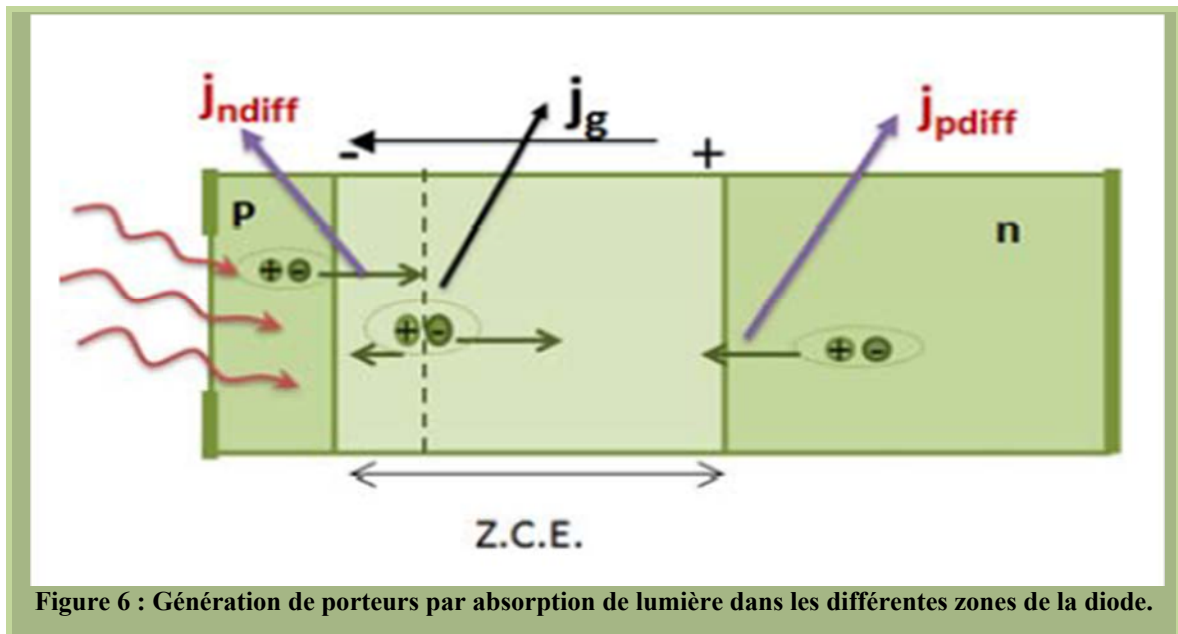


Figure 6 : Génération de porteurs par absorption de lumière dans les différentes zones de la diode.

Les photons incidents créent des paires électron-trou dans chacune des régions p, ZCE et n :

Dans les régions neutres p et n, les porteurs minoritaires diffusent. Ceux qui atteignent la charge d'espace sont attirés par le champ et contribuent au courant par leur diffusion créant un photo-courant de diffusion (I_{diff}).

Dans la ZCE, les paires électron-trou créées sont dissociées par le champ électrique, L'électron est propulsé vers la région n et le trou vers la région p. ces deux photo-porteurs donnent naissance à un photo-courant de génération (I_g).

Les deux mécanismes s'ajoutent pour donner naissance au photo-courant I_{ph} :

$$I_{ph} = I_{ndiff} + I_{pdiff} + I_g \quad (I.2)$$

Ce photo-courant contribue alors à l'augmentation du courant inverse de la diode [12] :

$$I = I_s \left(e^{v/u_r} - 1 \right) - I_{ph} \quad (I.3)$$

❖ 1.5. CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES :

Une photodiode au silicium peut être représentée par une source de courant en parallèle avec une diode idéale (figure 7). La source de courant représente le courant généré par le rayonnement incident et la diode représente.

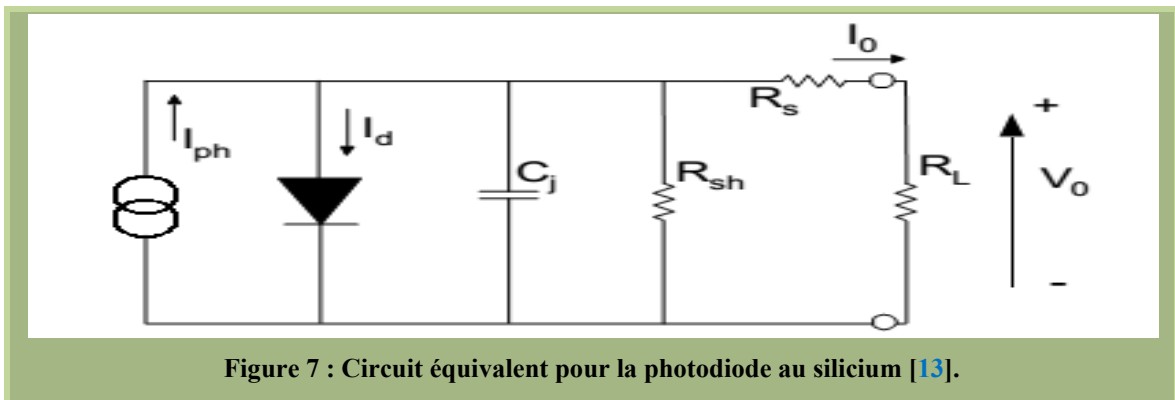


Figure 7 : Circuit équivalent pour la photodiode au silicium [13].

La jonction p-n. De plus, une capacité de jonction (C_j) et un shunt résistance (R_{SH}) sont en parallèle avec les autres composants. La résistance série (R_S) est connectée en série avec tous les composants de ce modèle.

⚡ 1.5.1. Résistance Shunt, R_{SH}

La résistance parallèle est la pente de la courbe courant-tension de la photodiode à l'origine, c'est-à-dire $V = 0$. Bien qu'une photodiode idéale devrait avoir une résistance de shunt infinie, les valeurs réelles se situent entre 10 et 1000 méga ohms.

⚡ 1.5.2. Résistance série, R_S :

La résistance en série d'une photodiode découle de la résistance des contacts et de la résistance du silicium non appauvri (Figure 7). Il est donné par:

$$R_s = \frac{(W_s * W_d)}{A} + R_c \quad (I.4)$$

Où W_s est l'épaisseur du substrat, W_d est la largeur de la région appauvrie, A est l'aire diffusée de la jonction, la résistivité du substrat et R_c est la résistance de contact. La résistance série sert à déterminer la linéarité de la photodiode en mode photovoltaïque (pas de polarisation, $V = 0$)

✚ I.5.3. Capacité de jonction, C_J :

La capacité de jonction est directement proportionnelle à la zone diffusée et inversement proportionnelle à la largeur de la région d'appauvrissement. De plus, les substrats de résistivité plus élevée ont une capacité de jonction plus faible. De plus, la capacité dépend de la polarisation inverse comme suit:

$$C_J = \frac{\epsilon_{si0} A}{\sqrt{2} \epsilon_{si0} (v_A + v_{bi})} \quad (I.5)$$

Où $\epsilon_{si0} = 8.854 \times 10^{-14}$ F / cm, est la permittivité de l'espace libre, $\epsilon_{si} = 11.9$ est la constante diélectrique du silicium, $\mu = 1400$ cm² / Vs est la mobilité des électrons à 300 °K, ϵ_{si} est la résistivité du silicium, V_{bi} est la tension intégrée du silicium et V_A la polarisation appliquée. La capacité de jonction est utilisée pour déterminer la vitesse de réponse de la photodiode.

❖ I.6. Structures dérivées :

✚ I.6.1 Photodiode P-I-N:

La largeur de la couche d'appauvrissement peut être augmentée artificiellement, en ajoutant une région intrinsèque intermédiaire. Comme la région intrinsèque a une résistance élevée, une petite polarisation inverse suffit à augmenter la largeur de la région d'appauvrissement de manière à ce qu'elle s'étende dans la couche n. Un autre avantage d'une diode p-i-n est que la séparation des charges dans la région active est plus grande, ce qui conduit à une capacité de jonction plus faible [14].

De plus, la région I est généralement large de sorte que les photons qui pénètrent dans le Composant ont une plus grande probabilité d'absorption dans la région intrinsèque, plutôt que dans les régions p et n.

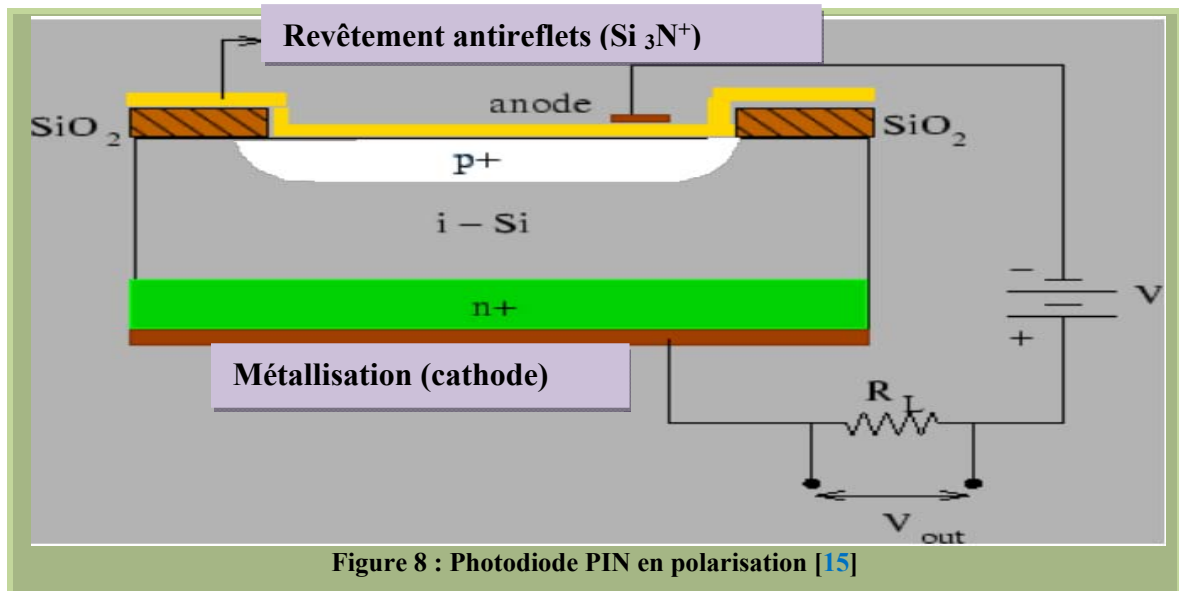


Figure 8 : Photodiode PIN en polarisation [15]

I.6.2. Densité de charge et le champ électrique :

La densité de charge et le champ électrique d'un détecteur p-i-n sont indiqués à côté. Le champ électrique dans la région intrinsèque est uniforme et a une magnitude telle que, comme dans le cas de la photodiode p-n :

$$E_0 = \frac{N_a q x_p}{E_0 k} \tag{I.6}$$

- x_p : largeur de la région d'appauvrissement dans le côté p.

(E) dérivé de la photodiode à jonction p-n, en remplaçant par la somme algébrique de la tension incorporée et de la polarisation inverse appliquée

$$E_0 = \sqrt{\frac{2q}{E_0 K} (V_B - V) \frac{N_a * N_d}{N_a + N_d}} \tag{I.7}$$

✚ I.6.3. La largeur de la région d'épuisement (w):

La largeur de la région d'épuisement est alors donnée par :

$$W = \left[\frac{2E_0 k}{q} (v_b - v) \frac{N_a + N_d}{N_a * N_d} + X^2 \right]^{1/2} \quad (\text{I.8})$$

Sachant que :

- V_B : potentiel de jonction.

$$V_B = \frac{kT}{q} \frac{N_d * N_a}{n_i^2} \quad (\text{I.9})$$

- N_a : densité d'accepteur. N_d : densité de donneurs (les é).
- x_i : la largeur de la couche intrinsèque.

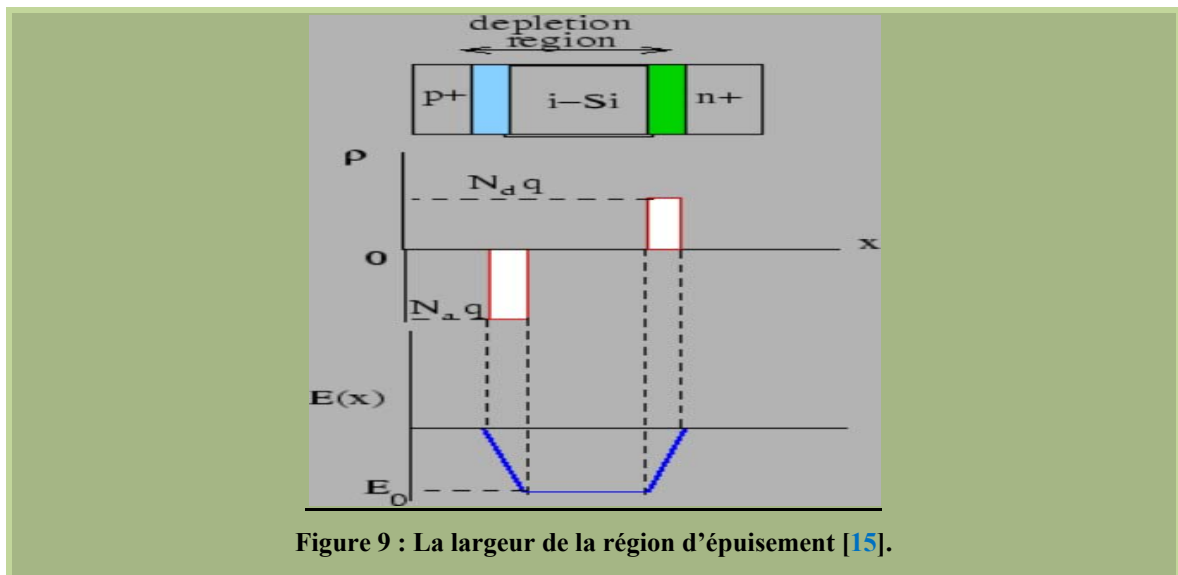


Figure 9 : La largeur de la région d'épuisement [15].

❖ I.6.4. Matériaux utilisés :

Dans le visible et parfois pour l'infrarouge, on utilise surtout le Si et le Ge. Dans l'infrarouge, on trouve également le GaAs, InAs, etc...

❖ I.6.5 Photodiode PIN est rapide lorsque :

- La zone de charge d'espace W est très large, proche de la zone d'entrée (20 à 50 μm), donc la capacité de la diode est faible et sa fréquence de coupure est élevée.
- Il y a beaucoup de génération (dans la zone de charge d'espace).

❖ I.7. Photodiode Schottky :

La diode Schottky est obtenue par dépôt d'une fine couche métallique sur base semi-conducteur. Ces photodiodes à jonction métal-semiconducteur présentent par rapport aux structures classiques l'avantage d'avoir un domaine spectral plus étendu. Une photodiode Schottky est constituée d'un substrat de silicium de type n, sur lequel est déposée une couche mince métallique, généralement de l'or. On réalise ainsi une barrière de Schottky. Lorsque le rayonnement crée des paires électron-trou dans la zone de charge d'espace du semi-conducteur, la diode est le siège d'un photo-courant de génération analogue à celui de la photodiode à jonction P-N. L'avantage de la photodiode Schottky réside dans le fait que la couche métallique, si elle est suffisamment mince, est transparente au rayonnement dans le domaine du proche ultraviolet [16].

❖ I.7.1. Certains avantages des photodiodes Schottky :

Les photodiodes Schottky présentent certains avantages par rapport aux photodiodes PIN pour certaines applications. Un avantage est un problème pratique dans la fabrication des dispositifs. Pour connecter la photodiode Schottky aux fils du circuit externe, une seule connexion métal-semi-conducteur doit être établie (métal-n +) et des contacts ohmiques sont facilement formés pour une telle jonction. Un autre avantage de la photodiode Schottky est une meilleure réponse temporelle. Comme il lui manque la couche de type p d'une photodiode PIN, il n'y a pas de queue de diffusion résiduelle provenant des porteurs de charge générés dans la couche de type p. Cela devient particulièrement important pour les courtes longueurs d'onde, pour lesquelles le coefficient d'absorption élevé entraînerait l'absorption d'une fraction importante de la lumière dans la couche mince de type p d'une photodiode à code PIN. Les photodiodes Schottky avec des largeurs de bande comprises entre 25 et 60 GHz sont disponibles dans le commerce.

Un autre avantage de la photodiode Schottky est que les jonctions métalliques peuvent être réalisées avec une grande variété de semi-conducteurs, y compris ceux à large bande interdite Eg.

❖ I.7.2. Applications de la photodiode Schottky :

La photodiode Schottky est particulièrement compatible avec la technologie du silicium et du siliciure mature. En conséquence, ces photodiodes ont été largement utilisées dans le CCD - dispositif à couplage de charge - en tant que photo-détecteur à détection d'image.

La photodiode Schottky peut être intégrée dans une seule puce avec une porte de transfert CCD - celles-ci sont également compatibles avec la technologie du silicium. Le CCD lui-même forme un registre à décalage pour permettre aux données du groupe de détecteurs de photodiodes Schottky d'être transférées hors de la puce globale de manière gérée - une méthode permettant d'extraire les énormes fichiers de données du grand groupe de photo-détecteurs avec un nombre raisonnable de fils sur le circuit intégré. En raison de ces avantages, le détecteur à photodiode Schottky est la technologie la plus largement utilisée pour les matrices planes focales [17].

❖ I.8. Photodiode à hétérojonction :

C'est une structure qui associe deux semi-conducteurs à gaps différents. On dépose par épitaxie sur un matériau semi-conducteur de type donné (P par exemple) un autre matériau de gap différent et de type opposé. Parmi les photodiodes à hétérojonction on peut citer les diodes à Te-Ge ; Te-Si ; InSb-InAs ; Ge-GaAs [18].

❖ I.9. La photodiode à cavité résonante :

La cavité résonante est représentée par une structure à multipuits quantique constituée par une succession de couches de deux semi-conducteurs à gap différent, voir la figure 10, on obtient ainsi une structure à variation périodique de l'indice de réflexion, de telle sorte qu'elle présente une bande permise pour la réflexion de l'onde électromagnétique, cette bande permise est constituée par l'interférence additive de toutes les réflexions partielles [19].

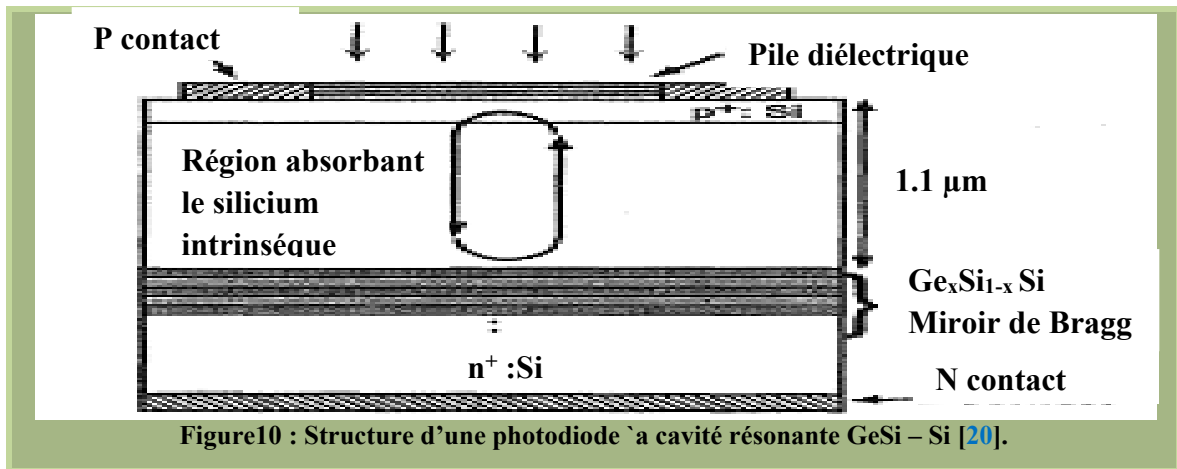


Figure10 : Structure d'une photodiode à cavité résonante GeSi – Si [20].

Le faisceau lumineux incident peut être partiellement réfléchi par le miroir semi-réfléchissant du haut, est une première fois absorbé en partie dans la fine couche active puis est réfléchi par le miroir du bas et repasse dans la zone active. La cavité est étudiée de telle sorte que l'onde incidente interfère de façon constructive avec l'onde réfléchie. Le champ optique est ainsi augmenté dans la cavité Fabry-Perot, ce qui permet d'utiliser une couche active fine tout en obtenant des rendements quantiques élevés, 99% théoriquement,[21] et pratiquement 90%, 94% et 99%, d'après respectivement[22] (sur InGaAs à $\lambda = 1,52\mu\text{m}$),[23] (sur InGaAs à $\lambda = 1,3\mu\text{m}$)[24] et (sur GaAs à $\lambda = 0,812\mu\text{m}$), pour des photodiodes PIN.

❖ I.10.photodiode UTC :

Comparé aux photodiodes classiques, un moyen pour améliorer à la fois le produit bande passante-rendement et le courant de saturation du composant est d'utiliser seulement les porteurs les plus rapides, les électrons, à leur vitesse dite d'overshoot afin d'éviter l'effet de charge d'espace (space-charge effect). L'effet de charge d'espace est un effet qui limite la vitesse de porteurs à fort courant photo généré [25]. Il en résulte un effet de forte injection qui crée une réduction du champ électrique dans la ZCE, voire un champ électrique contraire, qui ralentit les photo-porteurs.

La photodiode UTC combat cet effet. Elle a été présentée pour la première fois en 1997 par les chercheurs du laboratoire japonais NTT, Ishibashi et al. [26] et [27].

Des structures similaires avaient été présentées antérieurement pour diminuer le courant d'obscurité, [28] et réduire la capacité de jonction, [29]. La structure UTC utilise la vitesse élevée des électrons (comparée à celle des trous) et le phénomène d'overshoot dans la couche de collection des porteurs pour retarder l'effet de charge d'espace, ce qui entraîne un meilleur courant de saturation par rapport aux photodiodes PIN conventionnelles [30].

I.10.1. Principe fonctionnement d'une photodiode UTC [31] :

D'une photodiode PIN dans laquelle on a dissocié la zone d'absorption et la zone de déplétion. En effet, la zone active est la zone fortement dopée P de la photodiode, appelée aussi "base". Elle est entourée d'un côté par une barrière de diffusion du côté du contact de base pour empêcher les électrons photo-générés de diffuser dans la mauvaise direction et de l'autre côté d'un semi-conducteur à grand gap non-dopée et transparent à la longueur d'onde de fonctionnement. Celui-ci constitue la zone de collection des électrons. Les paires électrons-trous sont photo-générées dans la base fortement dopée P.

Les trous étant fortement en excès sont majoritaires et vont être évacués rapidement vers le contact de base par effet de relaxation diélectrique. Les électrons, porteurs minoritaires, vont diffuser dans la base jusqu'à la zone déplétion où ils seront accélérés sous l'effet du champ électrique et dériveront jusqu'à la zone dopée N [31].

Seuls les électrons sont considérés comme porteurs minoritaires se déplaçant dans la zone de charge d'espace et ainsi eux seuls déterminent le temps de transit.

La figure 11 résume le principe de fonctionnement d'une photodiode PIN à éclairage vertical avec pour zone active, la zone intrinsèque. L'éclairage vertical peut être effectué par dessus ou par dessous suivant les structures et matériaux utilisés. L'éclairage latéral permettra de lever le compromis rapidité/détection.

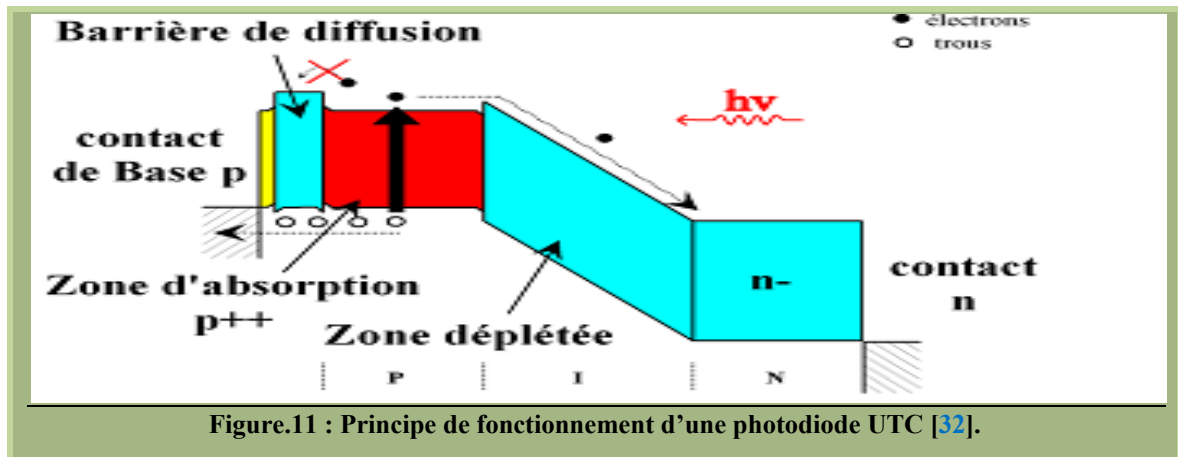
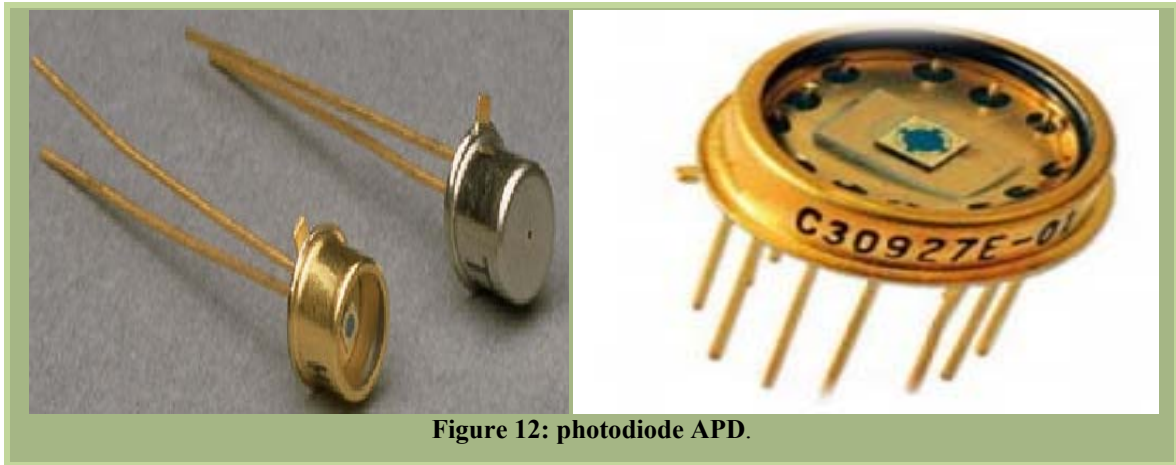


Figure.11 : Principe de fonctionnement d'une photodiode UTC [32].

❖ I.11. Photodiode à avalanche (APD) :

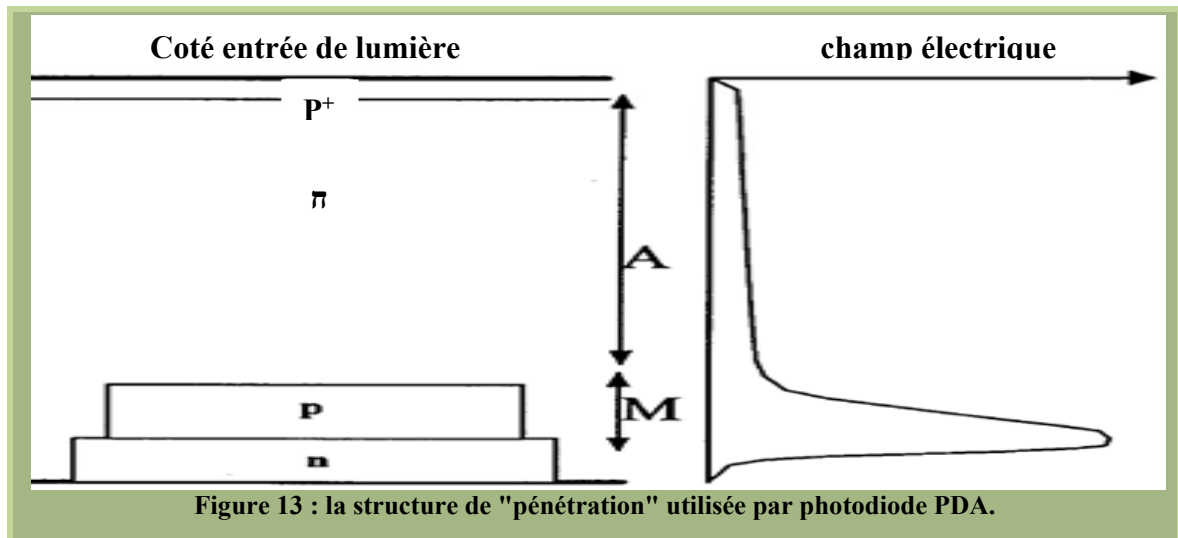
La photodiode à avalanche (APD) est un dispositif électronique à semi-conducteur très sensible qui exploite l'effet photoélectrique pour convertir la lumière en électricité. Les APD peuvent être considérées comme des photo-détecteurs qui fournissent un premier stade intégré de gain grâce à la multiplication par avalanche. D'un point de vue fonctionnel, ils peuvent être considérés comme l'analogue semi-conducteur des photomultiplicateurs. En appliquant une tension de polarisation inverse élevée (typiquement 100 à 200 V dans le silicium), les APD montrent un effet de gain de courant interne (environ 100) dû à l'ionisation par impact (effet d'avalanche). Cependant, certains APD en silicium utilisent des techniques de dopage et de biseautage alternatives par rapport aux APD classiques, qui permettent d'appliquer une tension supérieure ($> 1\ 500\ \text{V}$) avant que le claquage ne soit atteint et par conséquent un gain de fonctionnement supérieur (> 1000). En général, plus la tension inverse est élevée, plus le gain est élevé.



✚ I.11.1. Structures la photodiode à avalanche (APD) :

Afin de comprendre pourquoi plus d'une structure APD existe, il est important d'apprécier les compromis de conception qui doivent être pris en charge par le concepteur APD. La DPA idéale serait zéro bruit sombre, pas de bruit excessif, réponse spectrale et fréquentielle large, plage de gain de 1 à 10^6 ou plus, et à faible coût. Plus simplement, un APD idéal serait une bonne photodiode PIN avec gain. En réalité, cependant, cet objectif est difficile à atteindre en raison de la nécessité de compromis exigences de conception contradictoires. Quels sont certains de ces compromis, et comment ils sont optimisés dans les APD disponibles dans le commerce, sont énumérés ci-dessous. Examinez la coupe transversale schématique d'une structure APD typique illustrée à la figure 12. Le schéma de base Les éléments structurels fournis par le concepteur APD comprennent une zone d'absorption "A" et une région de multiplication "M". Présent à travers la région "A" est un champ électrique "E" qui sert à séparer les trous photo-générés et électrons, et balaie un porteur vers la région de multiplication. La région de multiplication "M" est conçue pour présenter un champ électrique élevé de fournir un gain photo-courant interne par ionisation par impact. Cette région de gain doit être suffisamment large pour fournir un gain utile, M , d'au moins 100 pour le silicium. APD, ou 10-40 pour les APD au germanium ou InGaAs [33].

De plus, le profil de champ électrique multipliant doit permettre d'obtenir un gain effectif à l'intensité du champ inférieure au champ de claquage de la diode.



Cette structure offre la meilleure combinaison disponible de haute vitesse, faible bruit et faible capacité, et réponse IR étendue.

🚦 I.11.2. Comparaison entre les photodiodes PIN et PDA:

Une comparaison entre leurs performances est présentée dans le Tableau ci-dessous :

Type de photodiode	Photodiode	
	PIN	PDA
Tension de commande (V)	Faible	Elevé
Fréquence de coupure(GHz)	>60	Quelques
Rendement quantique(%)	Faible	Elevé
Bande passante(GHz)	large	Faible
Longueur d'onde (nm)	1300 et 1550	1300 et 1550

Tableau 2: comparaison des caractéristique de photodiode PIN et PDA [34].

✚ I.11.3.Principe de fonctionnement de la photodiode APD:

Le fonctionnement de la photodiode à avalanche est similaire à la jonction PN et à la photodiode PIN, sauf qu'une tension de polarisation inverse élevée est appliquée en cas de photodiode à avalanche pour obtenir une multiplication par avalanche. L'application d'une tension de polarisation inverse élevée à la photodiode d'avalanche n'augmentera pas directement la génération de porteurs de charge. Cependant, il fournit de l'énergie aux paires électron-trou générées par la lumière incidente. Lorsque l'énergie lumineuse est appliquée à la photodiode d'avalanche, des paires électron-trou sont générées dans l'épuisement. Les paires électron-trou générées éprouvent une force due au champ électrique de région d'épuisement et au champ électrique externe. Dans une photodiode à avalanche, une tension de polarisation inverse très élevée fournit une grande quantité d'énergie aux porteurs minoritaires (paires électron-trou). Les transporteurs minoritaires qui gagnent une grande quantité d'énergie sont accélérés à des vitesses plus élevées. Lorsque les électrons libres se déplaçant à grande vitesse entrent en collision avec l'atome, ils frappent plus d'électrons libres. Les électrons libres nouvellement générés sont de nouveau accélérés et entrent en collision avec d'autres atomes.

En raison de cette collision continue avec les atomes, un grand nombre de porteurs minoritaires sont générés. Ainsi, les photodiodes d'avalanche génèrent plus de porteuses de charges que les photodiodes PN et PIN les photodiodes d'avalanche sont utilisées dans les applications où un gain élevé est un facteur important [35,36].

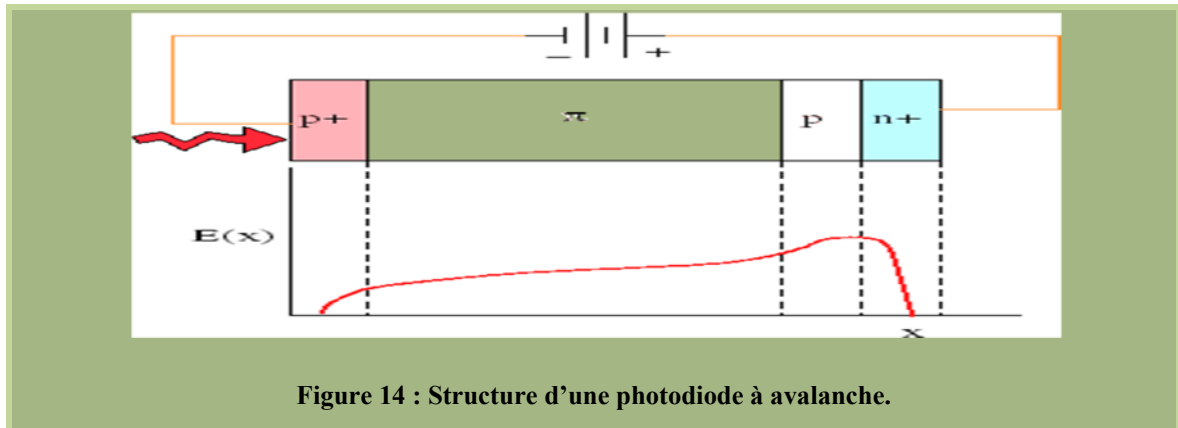


Figure 14 : Structure d'une photodiode à avalanche.

❖ I.11.5. Décomposition en avalanches :

La décomposition en avalanches est un phénomène qui peut se produire à la fois dans les matériaux isolants et semi-conducteurs. C'est une forme de multiplication du courant électrique qui peut permettre des courants très importants dans des matériaux qui sont par ailleurs de bons isolants. C'est un type d'avalanche d'électrons. Le processus d'avalanche se produit lorsque les champs de la région de transition sont accélérés par le champ électrique à des énergies suffisantes pour créer des paires d'électrons libres ou mobiles via des collisions avec des électrons liés. Quelques détails supplémentaires sont nécessaires.

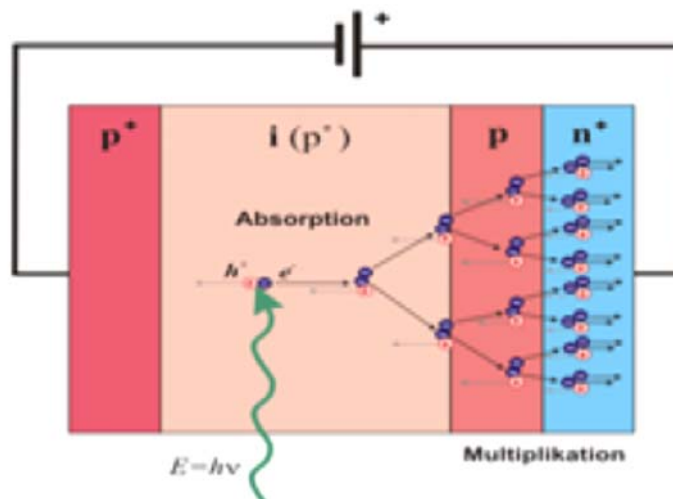


Figure15 : Effet d'avalanche.

✚ I.11.6 Ionisation par impact :

En présence d'un champ électrique dans un semi-conducteur, les porteurs sont accélérés et s'ils acquièrent suffisamment d'énergie, ils peuvent alors, lors d'une collision avec un atome de la maille cristalline, transférer une partie de cette énergie pour faire passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. C'est ce qu'on appelle l'ionisation par impact [37].

✚ I.11.7 Gain :

Le gain dans les photo-détecteurs est défini en pratique comme le rapport du nombre de paires électrons-trou effectivement collectées sur le nombre de paires électron-trou initialement générées par absorption de photons. Cependant dans le cadre de la modélisation des photo-détecteurs à avalanche, il convient de définir le gain sous forme analytique [38].

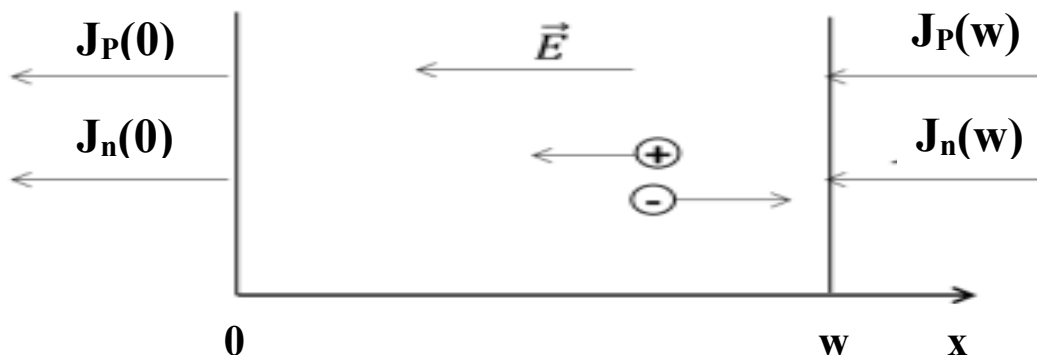


Figure 16 : Représentation de la zone de multiplication pour la détermination du gain.

On considère une zone de multiplication qui s'étend de $x = 0$ à $x = w$, représentée sur la Figure 16, et une paire électron-trou qui serait injectée avec une énergie initiale nulle en x , tel que $0 < x < w$. Soit $Jn(0)$ et $Jp(w)$ les densités de courant d'électrons et de trous primaires injectées dans la zone de multiplication. La densité de courant totale indépendante du temps, en régime continu est définie par :

$$J = Jn(x) + Jp(x) = \text{constante} \quad (\text{I.10})$$

M_n, M_p les facteurs de multiplication des électrons et des trous définis par le rapport de la densité de courant d'électrons (trous) entrante sur la densité de courant d'électrons (trous) sortante de la zone de multiplication :

$$M_n = \frac{J_n(W)}{J_n(0)} \quad (\text{I.11})$$

$$M_p = \frac{J_p(0)}{J_p(w)} \quad (\text{I.12})$$

Et $M(x)$ le facteur de multiplication du photo-courant.

$$M(x) = \frac{e^{-(\alpha-\beta)x}}{1 - \frac{\alpha}{\alpha-\beta} [1 - e^{-(\alpha-\beta)w}]} \quad (\text{I.12})$$

✚ I.11.8 Avantages de la photodiode à avalanche :

- Haute sensibilité
- Plus grand gain

✚ I.11.9. Inconvénients de la photodiode à avalanche :

- Génère un niveau de bruit élevé qu'une photodiode PN

✚ I.11.10. Applications photodiodes :

- La détection rapide des signaux faibles.
- L'asservissement.
- La photométrie.
- Les instruments de mesure.
- La télécommunication par fibre optique.
- L'image rie médicale Lecteurs de disques compacts.
- Détecteur de fumée.
- Applications spatiales.
- Les communications optiques.
- La mesure des intensités lumineuses extrêmement faibles.

❖ I.12.Conclusion :

A La fin de cette chapitre, nous avons donné un aperçu de quelques généralités sur les photodiodes telles que : qu'est ce que photodiode ?, principe de fonctionnement des photodiodes, leur caractéristique électrique, et leur structures dérivées, Nous nous sommes ensuite attachés à vous donner les caractéristiques les plus importantes de la photodiode que nous étudierons (LA PHOTODIODE A AVALANCHE) telle que : le gain de multiplication et le facteur de bruit, les résultats de cette étude vous seront présentés dans le troisième chapitre intitulé " Simulation numérique de la photodiode à avalanche à faible gain " .

CHAPITRE II

Initiation à l'outil de
simulation (SILVACO-
ATLAS)

❖ II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons simulé le comportement électrique d'un composant optoélectronique, et comment l'utiliser pour développer des programmes de simulation qui permettent le calcul des caractéristiques courant-tension des photodiodes à avalanche. Puis, nous avons réaliserons la description des différentes étapes de simulation électrique telles que le DOPAGE, le MAILLAGE, etc. Dans ce chapitre, nous allons présenter le simulateur TCAD-SILVACO, ses performances, son principe de fonctionnement, ses équations de bases, les modèles physiques utilisés dans cette simulation. Nous allons aussi présenter les différents outils de simulation tel que (ATHENA et ATLAS) avec la plateforme de programmation (DECKBUILD) l'outil de visualisation (TONYPLOT).ensuit, nous aillons donner une synthèse sur les différents paramètres géométriques et technologiques utilisés dans cette simulation.

L'outil de simulation utilisé dans ce travail est le logiciel TCAD-SILVACO. Ce logiciel permet de concevoir et prévoir les performances des dispositifs à base de semi-conducteur grâce à ces deux modules de simulation (ATHENA et ATLAS). Les différentes étapes du procédé technologique de fabrication (oxydation, diffusion, implantation ionique...), ainsi le comportement physique et les paramètres technologiques du composant électronique (distribution des porteurs dans la structure, profondeurs des jonctions, concentration des porteurs) ont été simulés à partir du logiciel ATHENA qui emploie des modèles physiques spécifiques. La simulation du comportement électrique du dispositif, a été réalisée au moyen de l'outil ATLAS.

❖ II.2. Silvaco :

Silvaco, Inc. est un fournisseur privé de logiciels de conception électronique (EDA) et de logiciels de simulation de processus [39] et d'appareils TCAD . Silvaco a été fondée en 1984 et son siège se trouve à Santa Clara, en Californie. En 2006, la société comptait environ 250 employés dans le monde entier [40].

Silvaco fournit des solutions d'automatisation de processus, de dispositifs et de conception de semi-conducteurs analogiques dans les technologies CMOS, bipolaires, SiGe et

composées. Parmi ses clients, on compte des sociétés de semi-conducteurs sans usine, des fabricants de semi-conducteurs intégrés, des fonderies et des universités du monde entier.

Sous SILVACO l'ensemble des outils de simulation et des outils interactifs permettant la conception et l'analyse de la plupart des dispositifs semi-conducteurs s'appel VWF (Virtual Wafer Fab). Les composants de base de VWF sont :

- Les outils de simulation (VWF core Tools). Ces outils simulent soit leurs processus de fabrication soit leurs comportements électriques. Les outils de simulation sont Athéna, Atlas et SSuprem3.
- Les outils interactifs (VWF interactive tools). Ces outils sont désignés pour être utilisés en mode interactif dans la construction d'un seul fichier d'entrée. En étant basé sur une interface utilisateur qui est graphique (Graphical User Interface, GUI), le travail de construction du fichier d'entrée devient plus efficace. Les outils interactifs peuvent être utilisés soit en relation avec un ensemble de fichiers, ou comme des composants intégrés dans l'environnant « VWF automation Tools »
- Les outils d'automatisation (VWF automation Tools). Ces outils permettent à l'utilisateur d'exécuter sur une grande échelle des études expérimentales pour créer des résultats pour l'analyse statistique suivante. Ces outils automatiques se servent de : la technologie de base de données répartie et des méthodes de logiciels de transmissions d'interprocessus.

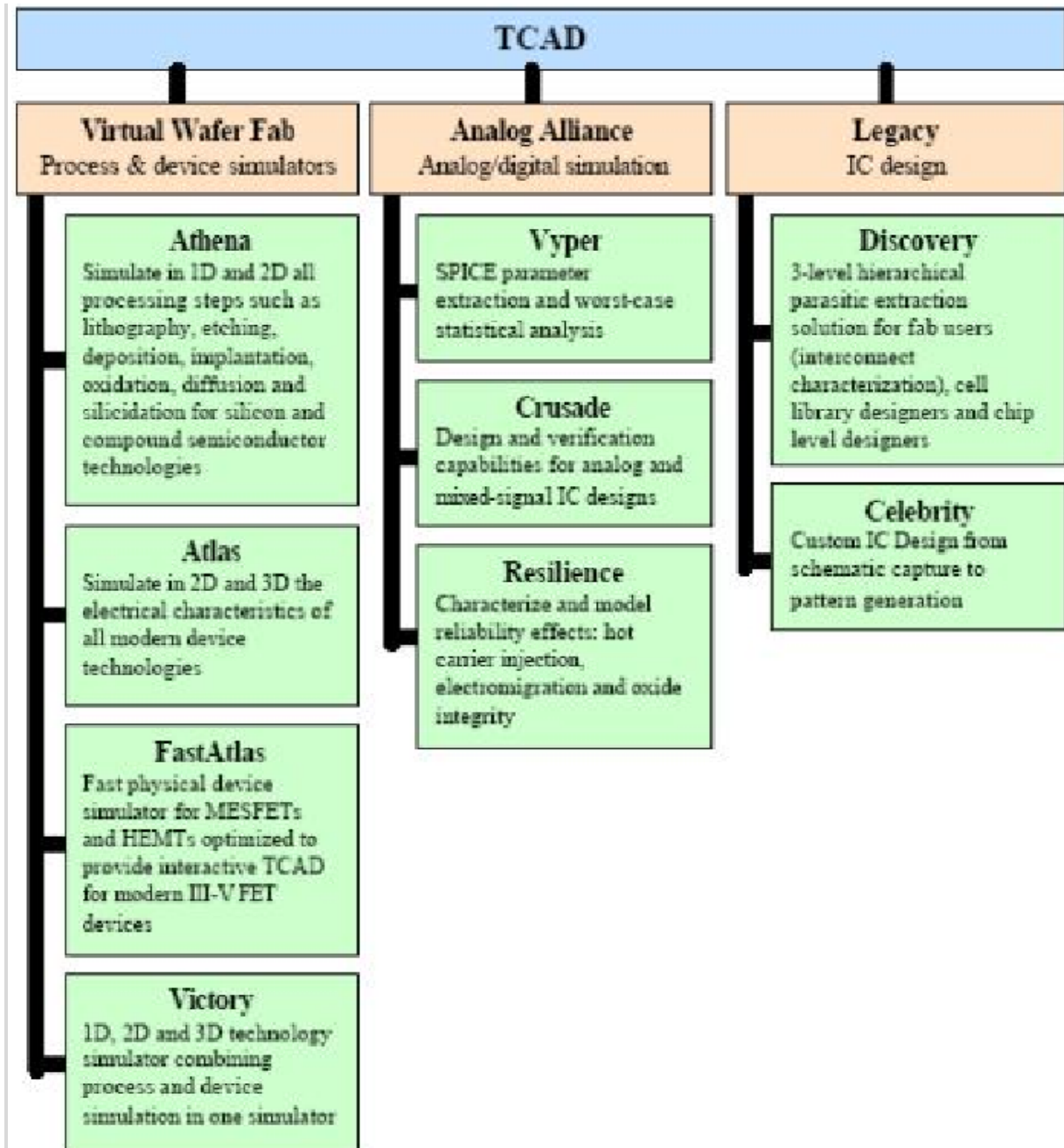


Figure. II.1 : La suite d'outils TCAD de SILVACO

❖ II. 3. Modules de simulation Silvaco TCAD:

🚩 II. 3.1. ATHENA :

ATHENA est un Simulateur de processus 2D désigné pour la création des structures avec une bonne résolution des mailles, et fait aussi l'implantation ionique et la diffusion des impuretés et l'oxydation et d'autres processus technologiques de fabrication.

✚ II. 3.2.SPDB (Process Data Base) :

SPDB est un produit séparé, ce n'est pas un outil interactif, mais il peut être utilisé avec DeckBuild. Il a été conçu pour stocker un grand nombre de profils de dopage mesurés expérimentalement ainsi que les données qui décrivent les conditions des expériences.

✚ II. 3.3. Atlas :

- ATLAS est un Simulateur de périphérique 1D / 2D / 3D.
- Un cadre modulaire et extensible pour la simulation de dispositifs semi-conducteurs à une, deux et trois dimensions”.
- ATLAS est conçu pour être utilisé avec les outils interactifs de VIRTUAL WAFER FAP(VWF), il s'agit de DECKBUILD ,TONYBLOT,DEVEDIT et MASKVIEWS [41].

➤ II. 3.3.1 DECKBUILD :

DECKBUILD est un environnement où on définit le programme de simulation.

➤ II. 3.3.2 TONYPLOT :

TONYPLOT est un environnement où on visualise les résultats des simulations (structure du composant, distributions de grandeurs diverses dans celui-ci, caractéristiques électriques...).

➤ II. 3.3.3 DEVEDIT :

DEVEDIT est un environnement où on dessine la structure à étudier (dimension, dopage, ...) et développe maillage

➤ II. 3.3.4 MaskViews :

MaskViews est un outil de dessin des masques (layouts).

✚ II. 3.4. SSUPREM3 :

SSUPREM est un simulateur de procédé 1D avec prolongements simples de simulations des dispositifs.

✚ II. 3.5. Mercury :

- Mercurey est un simulateur de périphérique 2D « rapide ».
- Il fournit des fonctionnalités générales pour la simulation numérique bidimensionnelle à base physique des FET.

✚ II. 3.6. Mocasim :

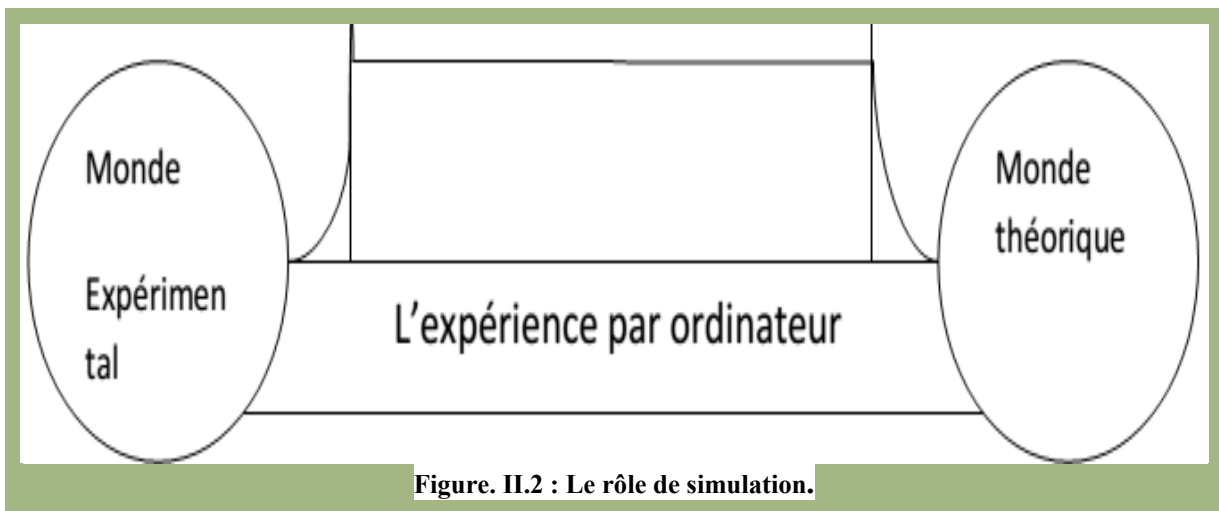
Mocasim est un simulateur avancé Monte Carlo à trois vallées conçu pour générer les paramètres de transport utilisés dans les simulateurs de dispositifs physiques.

✚ II. 3.7. Optimiseur :

Optimiseur est un outil d'optimisation automatique [41].

❖ II. 4. Rôle de la simulation :

La simulation fournit un lien entre le monde expérimental et le monde théorique comme le montre la figure 02. 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.



✚ II. 4.1. Simulation des composants semi-conducteurs (Quel est le besoin ?) :

Le rôle principal du simulateur est 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, F-V, Q-V, G-V, G-T ...

- Courbe à 2D inclus la courbe d'une grandeur comme par exemple le potentiel en fonction de la distance verticale y d'un composant.
- La courbe à 3D inclus un autre paramètre par exemple la distance verticale z.
- Vecteur : contient la courbe du champ électrique où bien la densité de courant en fonction du voltage et le vecteur de position.

❖ II. 5. Bases physiques du principe de fonctionnement du simulateur TCAD-SILVACO :

🚩 II. 5 .1. Equations de bases de la physique des semi-conducteurs :

Le simulateur « SILVACO » de dispositifs semi-conducteurs est basé sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson et de. Il calcule à chaque instant et en tout point de l'espace en une suite d'éléments finis, la concentration des électrons et des trous et la valeur du potentiel électrostatique.

➤ II. 5 .1.1. L'équation de Poisson :

Il relie les variations du potentiel électrostatique aux densités de charge d'espace [43] :

$$\operatorname{div}(\varepsilon \nabla \psi) = -\rho \quad (\text{II.1})$$

Où:

- ψ est le potentiel électrostatique.
- ε est la permittivité locale.
- ρ est la densité de charge d'espace locale

La densité de charge d'espace locale est la somme des contributions de toutes les charges fixes et mobiles, y compris les électrons, les trous et les impuretés ionisées.

Le champ électrique est obtenu à partir du gradient du potentiel [44]:

$$\vec{E} = -\nabla \psi \quad (\text{II.2})$$

➤ **II. 5 .1.2. L'équation de continuité :**

Les équations de continuité pour les électrons et les trous sont définies par les équations suivantes [45]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} - \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_n = G_n - R_n \quad (\text{II.3})$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \frac{1}{q} \operatorname{div} \vec{J}_p = G_p - R_p \quad (\text{II.4})$$

Où n et p sont la concentration d'électrons et de trous J_n et J_p sont, et le courant d'électrons et de trous densités, G_n et G_p sont les taux de génération d'électrons et de trous, R_n et R_p sont les taux de recombinaison d'électrons et de trous, et q est la magnitude de la charge d'un électron.

Par défaut, ATLAS comprend les équations 1-3 et 1- 4 Dans certaines circonstances, cependant, il suffit de résoudre une seule équation de continuité de porteuse. La spécification des équations de continuité à résoudre est effectuée dans l'instruction METHOD en désactivant toute équation qui ne doit pas être résolue. La syntaxe, ELECTRONS ou HOLES, désactive l'équation de continuité d'électrons et l'équation de continuité de trous, respectivement.

➤ **II. 5 .1.3. Modèle de mobilité :**

Les électrons et les trous sont accélérés par les champs électriques, mais perdent de leur élan à cause des processus de diffusion, notamment:

- Vibrations de réseau (phonons).
- Ions d'impureté.
- Autres transporteurs.
- Imperfections matérielles.

➤ II.5.1.4. Équations constitutives :

Des équations secondaires sont nécessaires pour spécifier des modèles physiques pour J_n , J_p , G_n , R_n , G_p , R_p [44].

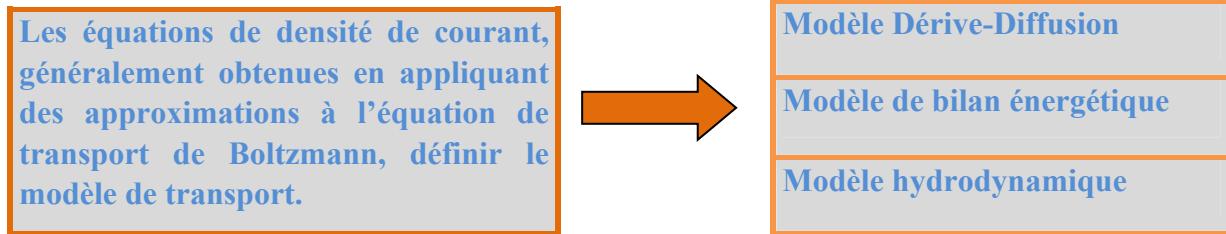


Figure II.3 : modèle de transport d'Équations constitutives.

Le modèle le plus simple des équations constitutives définit le modèle de dérive-diffusion

$$\vec{J}_n = qn\mu_n\vec{E}_n + qD_n\nabla_n \quad (\text{II.5})$$

$$\vec{J}_p = qp\mu_p\vec{E}_p + qD_p\nabla_p \quad (\text{II.6})$$

Où:

- μ_n et μ_p
- sont les mobilités des électrons et des trous.

$$D_n = \frac{K_B T_L}{q} \mu_n, D_p = \frac{K_B T_L}{q} \mu_p \quad (\text{II.7})$$

- Sont les relations d'Einstein.

$$\vec{E} = -\nabla\psi \quad (\text{II.8})$$

- Est le champ électrique.

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.

❖ II. 6. Modèles physiques utilisés :

🚦 II. 6.1. Modèles de recombinaison et de génération des porteurs :

La génération de porteurs-recombinaison est le processus par lequel le matériau semi-conducteur tente revenir à l'équilibre après avoir été dérangé. Si nous considérons un semi-conducteur à dopage homogène avec des concentrations de porteurs et d'équilibre, alors l'équilibre suivant :

$$n_0 \times p_0 = n_i^2 \quad (\text{II.9})$$

Les semi-conducteurs, cependant, sont continuellement excités, n et p étant perturbés par leurs états d'équilibre: n_0 et p_0 . Par exemple, la lumière qui brille à la surface d'un semi-conducteur de type p provoque la génération de paires électron-trou, perturbant grandement la concentration en porteurs minoritaires. Il en résulte une recombinaison nette qui tente de ramener le semi-conducteur à l'équilibre. Les processus responsables de la génération-recombinaison sont connus pour appartenir à six catégories principales sont : transitions phonon, transitions de photons, Transitions à la tarière, recombinaison de surface, ionisation par impact et tunneling. Les sections suivantes décrivent les modèles implémentés dans ATLAS qui tentent de simuler ces six types de mécanismes de recombinaison de génération.

🚦 II. 6.2. Modèles d'ionisation impact :

Dans toute charge d'espace d'une région avec une polarisation inverse élevée, le champ électrique sera suffisamment élevé pour accélérer les porteurs libres jusqu'à un point où ils disposeront de ressources suffisantes pour générer plus de porteurs libres en cas de collision avec les atomes du cristal. Pour acquérir suffisamment d'énergie, deux principes doivent être respectés.

Premièrement, le champ électrique doit être suffisamment élevé. Ensuite, la distance entre les collisions de la porteur libre doit être suffisante pour permettre une accélération suffisamment élevée. Autrement dit, la porteur doit gagner l'énergie d'ionisation E_i entre les collisions. Si le taux de génération de ces transporteurs gratuits est suffisamment élevés, ce processus conduira éventuellement à une rupture en avalanche.

Le processus général d'ionisation par impact est décrit par l'équation :

$$G = \alpha_n \left| \vec{J} \right|_n + \alpha_p \left| \vec{J} \right|_p \quad (\text{II.10})$$

Ici, G est le taux de génération local des paires électron-trou, α_n , α_p sont le coefficient d'ionisation pour des électrons et des trous et J_n , J_p sont leurs densités actuelles. Le coefficient d'ionisation représente le nombre de paires électron-trou générées par un porteur par unité de distance parcourue. Les effets de l'ionisation et les effets de l'ionisation. Ces modèles sont des modèles locaux et non locaux.

Les premiers supposent que l'ionisation en un point particulier de l'appareil dépend uniquement du champ électrique à cette position. Les modèles non locaux, cependant, effectuent une approche plus rigoureuse en prenant en compte l'énergie que le transporteur gagne.

❖ II. 7. Atlas:

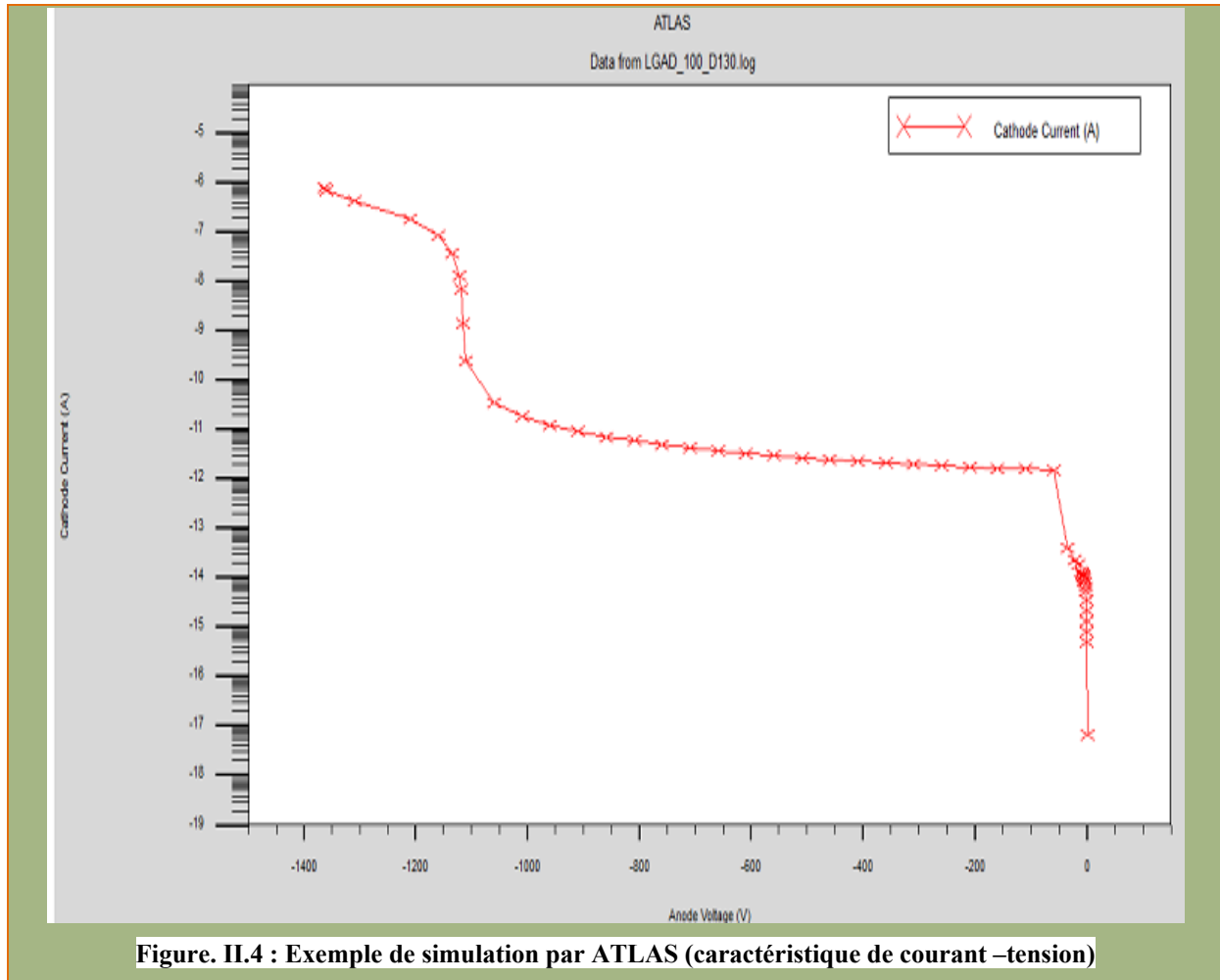
Atlas permet aux ingénieurs en technologie de dispositif de simuler le comportement électrique, optique et thermique de dispositifs à semi-conducteurs. Atlas fournit une plateforme extensible, facile à utiliser, basée sur la physique et permettant d'analyser les réponses DC, AC et du domaine temporel pour toutes les technologies à base de semi-conducteurs en 2 et 3 dimensions. Des algorithmes multithreads efficaces et robustes réduisent considérablement le temps de simulation tout en conservant la précision sur les machines à processeur parallèle [46].

Ce simulateur est composé de deux parties :

- Une partie de traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation).
- Une partie formée des modèles physiques du composant semi-conducteur : les plus courants sont : les modèles de recombinaison (Shockley Read Hall), d'ionisation par Impact (Selberherr et Toyabe), ainsi que les modèles de mobilité, et les statistiques de Fermi-Ditac et Boltzman.

ATLAS a été conçu de façon à pouvoir utiliser d'autres outils qui facilitent son utilisation.

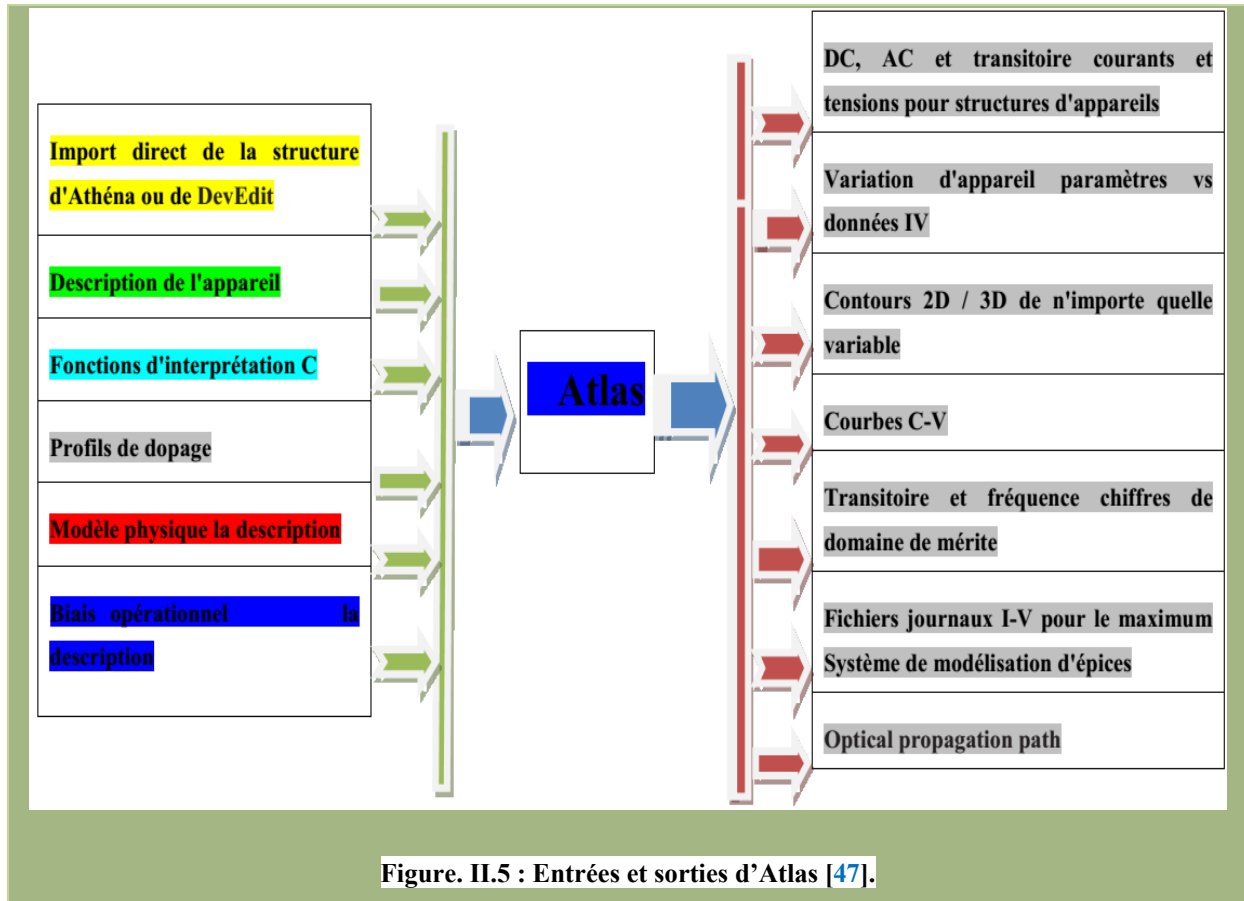
Dans le cadre de ce Travail Pratique, nous utiliserons uniquement les outils DECKBUILD et TONYPLOT.



II. 7.1. Entrées et sorties d'Atlas :

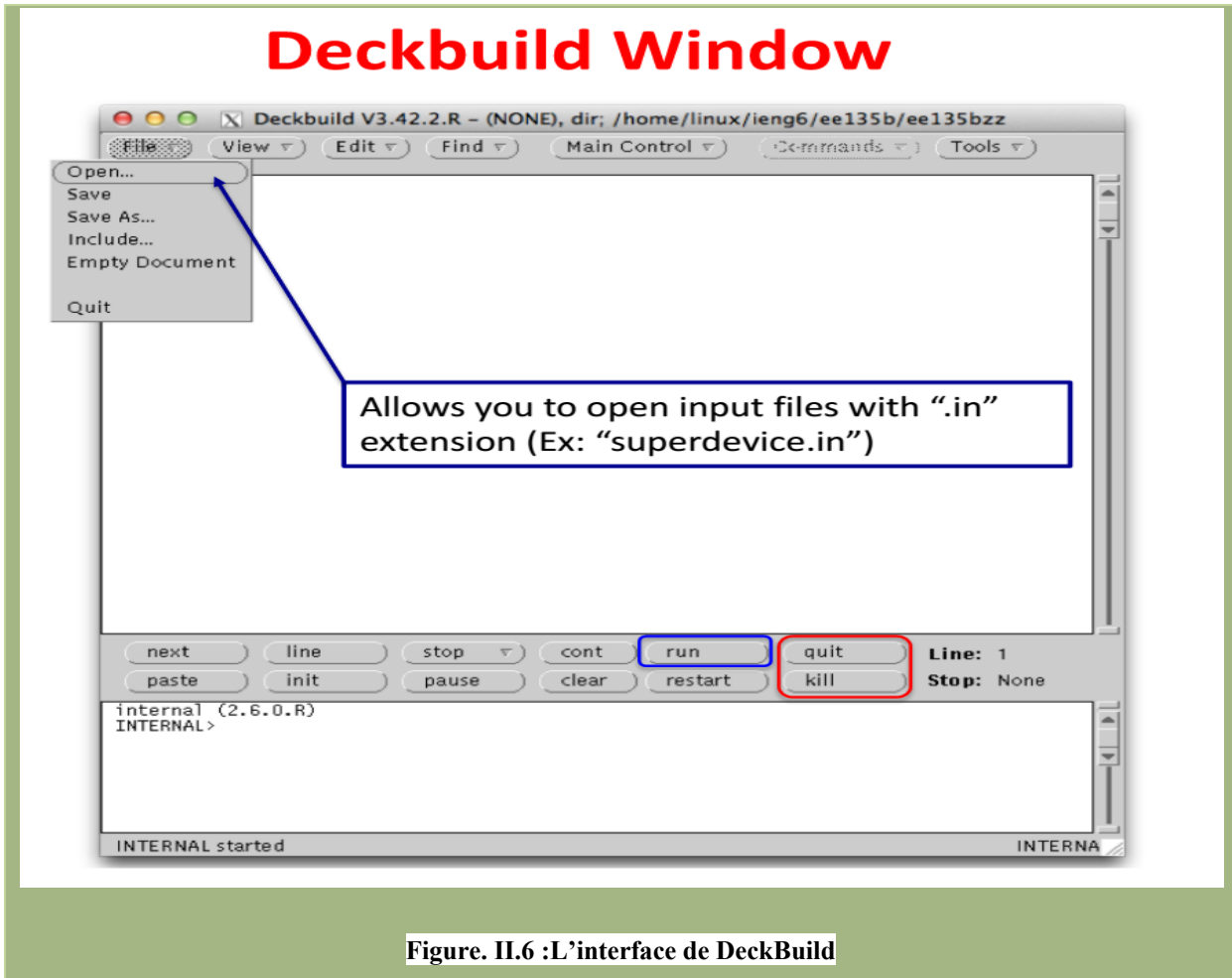
La figure II.4 illustre les types d'informations entrant et sortant d'ATLAS. La plupart des simulations ATLAS utilisent deux d'entrée (Fichiers de structure et Fichier de commande). Le premier d'entrée est un fichier texte contenant des commandes à exécuter par ATLAS. Le deuxième fichier d'entrée est un fichier de structure qui définit la structure à simuler.

ATLAS produit trois types de fichiers de sortie. Le premier type de fichier de sortie est la sortie au moment de l'exécution, qui vous indique la progression, les messages d'erreur et les avertissements au fur et à mesure de la progression de la simulation. Le deuxième type de fichier de sortie est le fichier journal, qui stocke toutes les tensions et courants du terminal issu de l'analyse du périphérique. Le troisième type de fichier de sortie est le fichier de solution, qui stocke les données 2D et 3D relatives aux valeurs des variables de solution dans le périphérique à un point de polarisation donné.



II. 7.2. DeckBuild :

DeckBuild est un environnement interactif de développement de fichiers d'entrée et d'exécution dans lequel tous les produits TCAD de Silvaco et plusieurs autres produits Silvaco peut courir. DeckBuild dispose de nombreux outils de style de débogueur spécifiques au simulateur et généraux, tels que des instructions d'extraction puissantes, un processus basé sur une interface graphique entrée de fichier, exécution d'exécution ligne par ligne et messages d'erreur syntaxiques de fichier d'entrée intuitive. DeckBuild contient une vaste bibliothèque de centaines d'exemples d'avant-projet couvrant de nombreuses technologies et matériaux, tout en permettant à l'utilisateur de devenir rapidement productif [48].



L'extension du fichier DeckBuild est “.in” et les fichiers d'entrée peuvent être écrits, exécutés et débogués ligne par ligne (de nombreuses fonctionnalités de création de fichier d'entrée et d'assistance au débogage, telles que l'exécution, la suppression, la pause, l'arrêt et la commencer) tout en faisant des changements en temps réel lors du développement des fichiers d'entrée, sans qu'il soit nécessaire d'exécuter le fichier depuis le début à chaque fois, comme cela est requis en mode de traitement par lots.

❖ II. 7.2.1. Définition du programme de simulation dans DECKBUILD

Lancer DECKBUILD par la commande « deckbuild »,et alors ,Dans la fenêtre du haut, il faut écrire le programme de la simulation, et dans la fenêtre du bas les résultats des simulations apparaitront. Voici un exemple de progmmme :

Fichier de simulation	Explications succinctes
Title (PHOTODIODE A AVALONCHE)	Titre de la simulation (facultatif)
Mech infile=diode-plane .str	Charge la structure dessinée dans Devedit
# Models Auger consrhcommob fidmob b.electrons=2 / b.holes=1evsatmod=0boltzaman bgn print /temprature= 300	Modélise mobilité et de recombinaison utilisée (On les choisit dans le menu) command /modeles/Category/ : Mobility ou recombinaison
#impact selber an1=703000bn 1=1,231e+06 Bn2=1 ,231e+06 1ap=671000 ap1=1 ,582e+06 / Bp1=1 ,693e+06 bp2=2,036e+06 betan=1betap1=1 /egran=400000	Modèle d'impact d'ionisation utilisé (on le choisit dans le menu <<command /models /models/catégorie : impact ionisation>>.
#methode newton intim it =25 atrap=0,5 maxtrap=4autonr /nrccriterion=0 ,1tol .time=0 ,005 dt.min=1e-25	Méthode numérique de résolution utilisée-nombre d'itérations.
Solve init	Initialisation de tous potentiels
Log outf=iv .log	Nom du fichier < .log> ou seront mémorisés les grandeurs électriques (potentiels, courants)
Solve vanode=0 .0vstep=0 ,1 vfinal=2,0name=anode	Montée de la tension d'onde de 0 à 2Volts avec un pas de 0.1 Volt.
Output e.field flowlines e.mobility h.mobility	Sauvegarde de grandeurs physiques : champ électrique, lignes de courant, mobilités.
Save outf=diodeplane-resu.str	Sauvegarde de a structure
End	Finale de la simulation

Tableau. II.1: Définition du programme de simulation dans DECKBUILD.

❖ II. 7.2.2. Lancer Atlas dans Deckbuild :

Lorsqu'Atlas est le simulateur actif dans Deckbuild, le menu Commandes est configuré pour les instructions Atlas et peut vous aider à créer le fichier d'entrée.

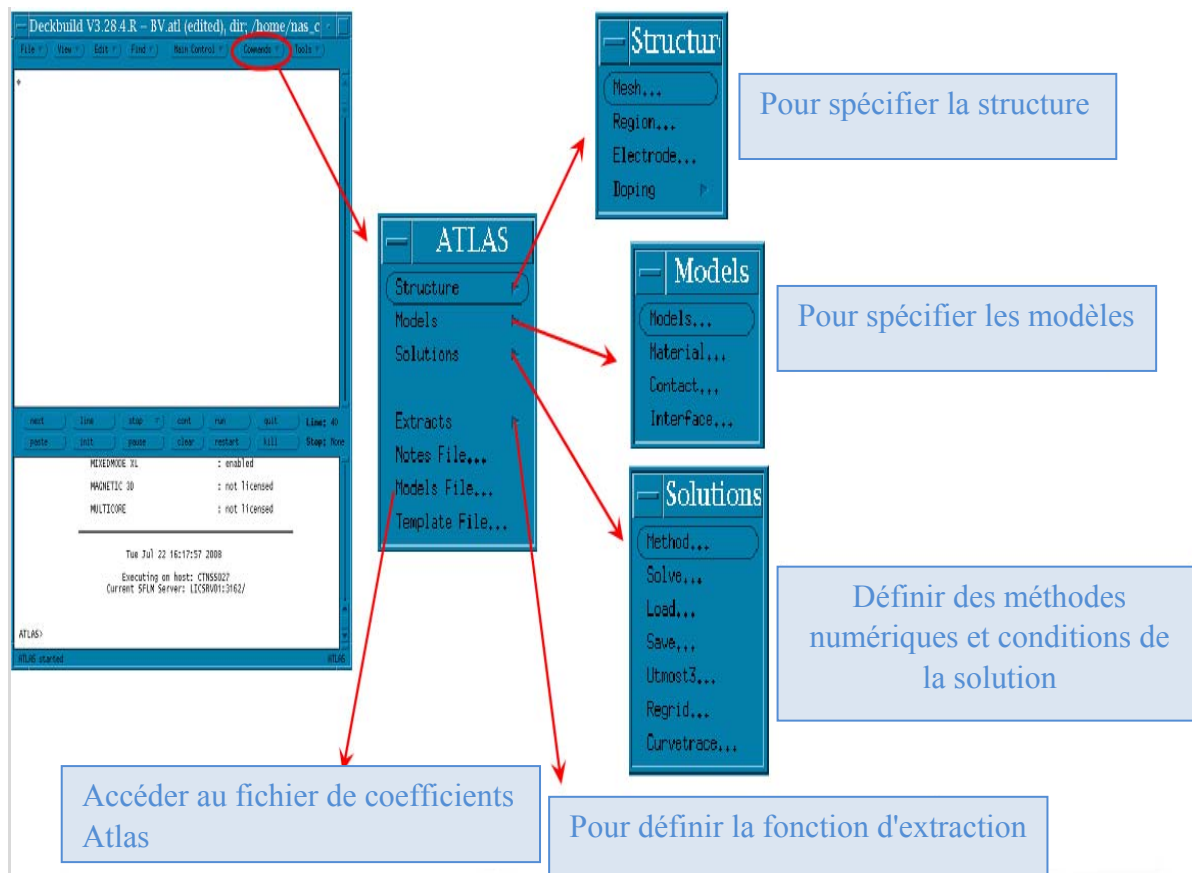


Figure II7 : lancer atlas dans Deckbuild.

II. 7.3. Tony Plot :

Tony Plot est l'outil de post-traitement graphique polyvalent de Silvaco utilisé par le logiciel TCAD de Silvaco, tel que ATHENA, ATLAS. Nous pouvons trouver les versions de TonyPlot pour les appareils 2D ou 3D. La version 3D permet de présenter la conception 3D et de couper la section transversale de l'appareil sur chacun des trois plans. La section exportée pourrait ensuite être transférée dans le fichier 2D [50].

Version de TonyPlot qui a un outil complet de jeu. En version 2D, nous pouvons trouver des fichiers journaux et des fichiers de structure que nous pouvons tracer



❖ II. 8. Déclarations et paramètres :

Atlas peut accepter des fichiers de description de la structure à partir d'Athéna et DevEdit, et aussi de ses propres fichiers de commande. Le développement de la structure souhaitée dans ATLAS se fait en utilisant un langage de programmation déclaratif. Dans ce qui suit, on donne un bref aperçu comment une structure est construite et simulée dans ATLAS.

Le fichier d'entrée Atlas contient une séquence de lignes de commande. Chaque ligne consiste en un mot-clé (instruction) qui identifie la commande et un ensemble de paramètres. Le format général est: `<STATEMENT><PARAMETER> = <VALUE>` Pour tout `<STATEMENT>`, ATLAS peut avoir quatre types différents pour le paramètre `<VALEUR>` [51]. Ce sont: Réel, Entier, Caractère et Logique.

Voici un exemple de ligne de déclaration:

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

Dans le fichier d'entrée Atlas, quatre groupes d'instructions doivent apparaître dans le bon ordre.

Groupe	Les déclarations
1. Spécification de la structure.	MESH
	ELECTRODE
	CONTACT
2. Spécification des modèles.	MODELS
3. Méthode de sélection numérique.	METHOD
4. spécification de la solution.	LOG
	SOLVE
	LOAD
	SAVE

Tableau II. 2 : Groupe commande ATLAS avec les instructions primaire dans chaque groupe.

II. 8.1. Spécification de la structure :

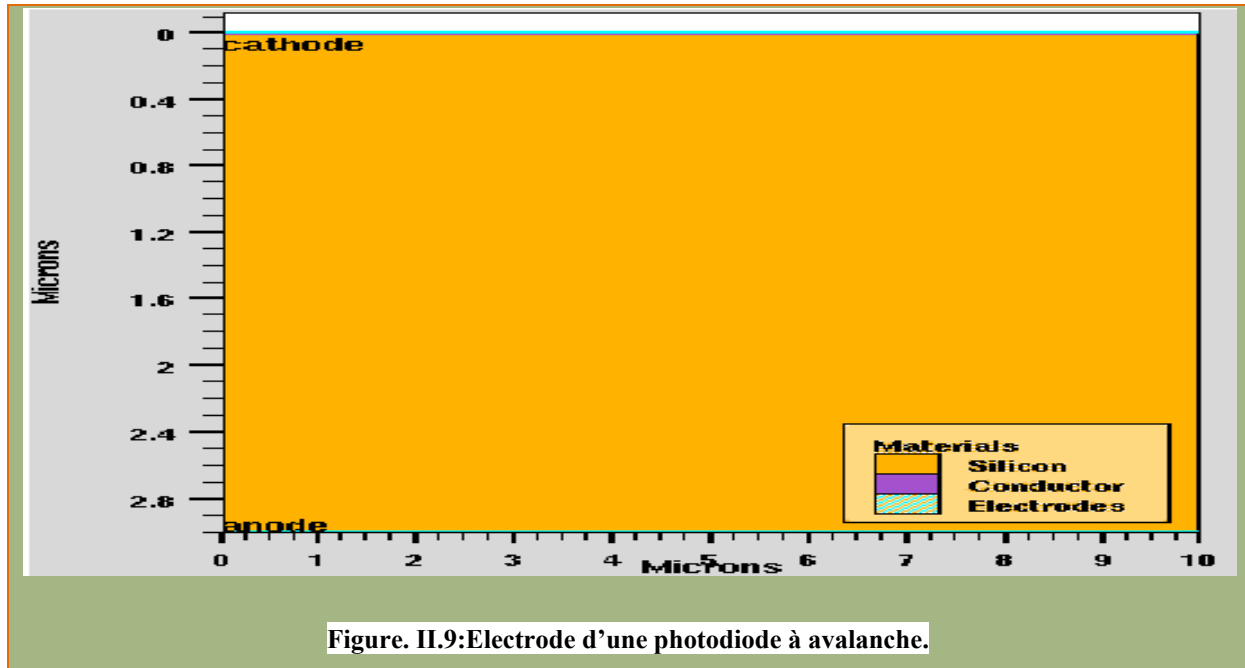
La spécification de la structure est obtenue en identifiant le maillage, la région, les électrodes et les niveaux de dopage.

➤ II. 8.1.1. Électrodes:

Pour définir les électrodes, une instruction ELECTRODE doit être générée:

Sélectionner [Structure](#) → [Electrode...](#) depuis le menu [Commandes](#).

Sous l'environnement SILVACO il est possible d'introduire jusqu'à 50 électrodes sur le même programme.



Le format général pour définir l'Electrode est :

ELECTRODE NAME=<electrode name><position parameters>

- Ex : `electr name=anode x.min=5 length=3top`
- `electr name cathode bottom`

Dans notre exemple une anode en haut de la structure avec une longueur de 3 μm et une cathode en bas de la structure.

- **X.MIN** : Spécifie le point de départ de l'électrode.
- **TOP** : la position de l'électrode est en haut de la structure (inverse : BOTTOM).
- **RIGHT** : la position de l'électrode se situe à la droite de la structure (inverse : LEFT).
- **II. 8.1.2. Spécification maillage :**

Le maillage joue un rôle important pour l'obtention de bons résultats. Ce maillage doit être fait avec précision pour garantir l'habileté des résultats. La méthode numérique utilisée pour résoudre les Equations physiques est la méthode des Eléments finis. Le choix de maillage doit être fait de façon à 'avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et précision des résultats. Un maillage Epais produit une rapide simulation, mais les résultats sont moins précis. Tandis qu'un maillage étroit produit un ralentissement de la simulation, mais des

résultats plus précis. Donc le maillage étroit est plus intéressant de point de vue résultat de la simulation.

Généralement l'instruction `mesh` sert pour spécifier le maillage sous la forme génitale (`MESH SPACE.MULT=<VALUE>`).

`SPACE.MULT` c'est un facteur de multiplication entre deux lignes de maillage défini par l'instruction `spacing` dans une direction donnée pour augmenter où pour diminuer le nombre de lignes de maillage.

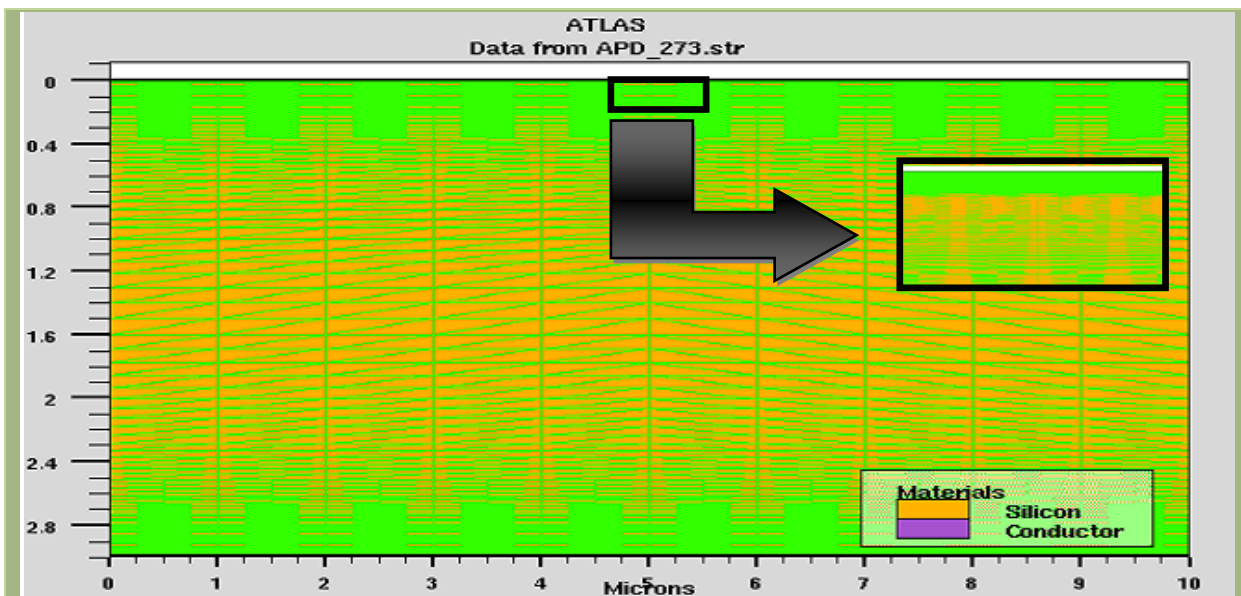


Figure. II.10: maillage d'une photodiode d'avalanche.

Une instruction qui définit le maillage proprement :

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

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

`X.mesh` définit le maillage dans la direction x, et `Y.mesh` définit le maillage dans la direction Y.

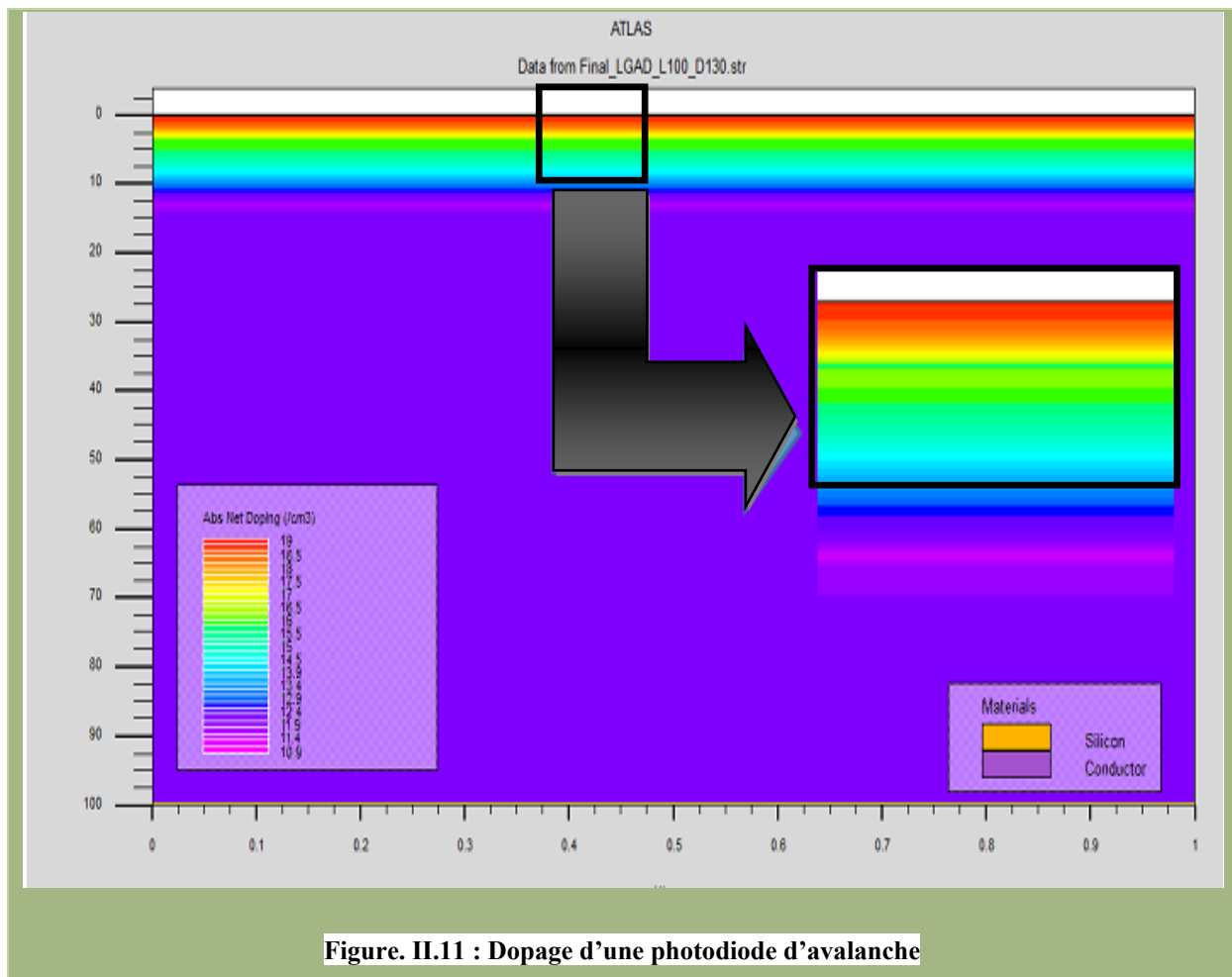
o EX: `x.mesh loc=0.00 spac=0.5`

`x.mesh loc=3.00 spac=0.2`

- **Loc** définit l'intervalle de maillage (dans notre cas entre $x=0 \mu\text{m}$ et $x=3 \mu\text{m}$)
- **Spac** définit la résolution du maillage, Dans notre cas, le maillage aura une résolution de $0.5\mu\text{m}$ à partir de $x=0$ et terminera par une résolution de $0.2\mu\text{m}$ à $x=3$.
- **II. 8.1.3. Spécification de Dopage :**

Un autre aspect pour la spécification de la structure qui doit être défini est le dopage. Le format de la déclaration de dopage dans ATLAS se fait avec l'instruction :

Doping région = <value><distribution> Concentration= value<type>



Toujours dans notre exemple la figure II.11 dopage pour la région 2 avec une distribution uniforme de type n et d'une concentration de $1 \text{ e}13 \text{ cm}^{-3}$ est donné par :

Doping region=2 uniform conc =1 e13 n.type

❖ II. 9. Spécifications des modèles et matériels :

Après la spécification du maillage et du dopage, on peut facilement modifier les caractéristiques des matériaux utilisés (électrodes, substrat) et changer leurs paramètres qui ATLAS les prend par défaut et définir notre choix du modèle physique qui sera utilisé pendant la simulation.

Ces actions sont accomplies par les instructions suivantes : CONTACT, MATERIAL et MODELS.

✚ II. 9.1. Spécification du matériel :

Les matériaux sont classés selon leurs propriétés physiques telle que : la conductivité (conducteurs, semi-conducteurs, isolants), l'affinité électronique, l'énergie du gap, la mobilité, la densité des porteurs et la vitesse de saturation.

✚ II. 9.2. Spécification du modèle :

Les modèles physiques peuvent être regroupés en cinq catégories : la mobilité, la recombinaison, statistiques porteurs, ionisation par impact et tunnels. Tous les modèles physiques sont spécifiés par les deux instructions MODELS et IMPACT.

✚ II. 9.3. Spécification du contact :

Indique les attributs physiques d'une électrode (résistivité, travail de sortie...)

✚ II. 9.4. Spécification de solution :

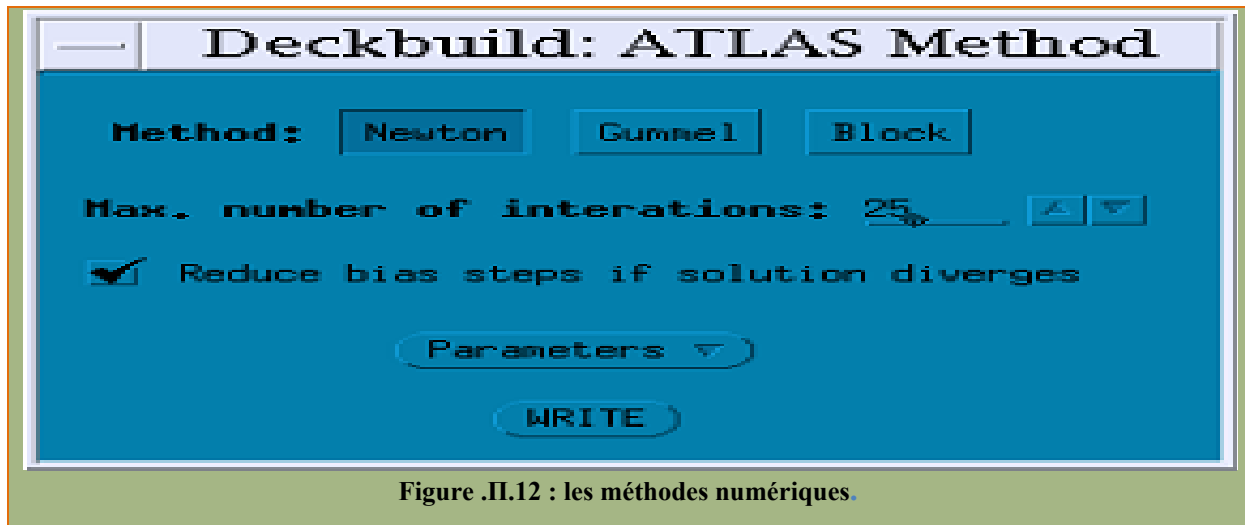
Dans le cas d'un courant continu (DC), et si le pas est 0,03V, la valeur initiale de la tension est -4V et la valeur finale est 4V, l'instruction qui permet de trouver les solutions (courant-tension) est donnée par : `solve name= anode vanode= -4 vstep=0,03 vfinal=4`

❖ II.10. Sélection de la méthode numérique :

Différentes méthodes numériques peuvent être utilisées pour calculer les solutions de semi-conducteurs. Les méthodes numériques sont données dans l'instruction METHOD:

[Solutions → Méthode... du Menu Commandes.](#)

Sélectionnez l'une des trois méthodes disponibles (**Newton, Gumel, Block**).



II.11. Conclusion :

Ce chapitre a présenté tout d'abord, Modules de simulation Silvaco TCAD, les équations de base des semi-conducteurs, particulièrement, l'équation de Poisson, l'équation de Continuité, les modèles de transport des porteurs de charge et les modèles d'ionisation par impact. Ensuite, nous avons présenté la structure étudiée (photodiode à avalanche) ainsi que ses profils de dopage. Une simulation numérique de la photodiode APD a été effectuée par le logiciel SILVACO afin de décrire le principal comportement tel que la distribution du potentiel, champ électrique, dopage et facteur de bruit.

CHAPITRE III

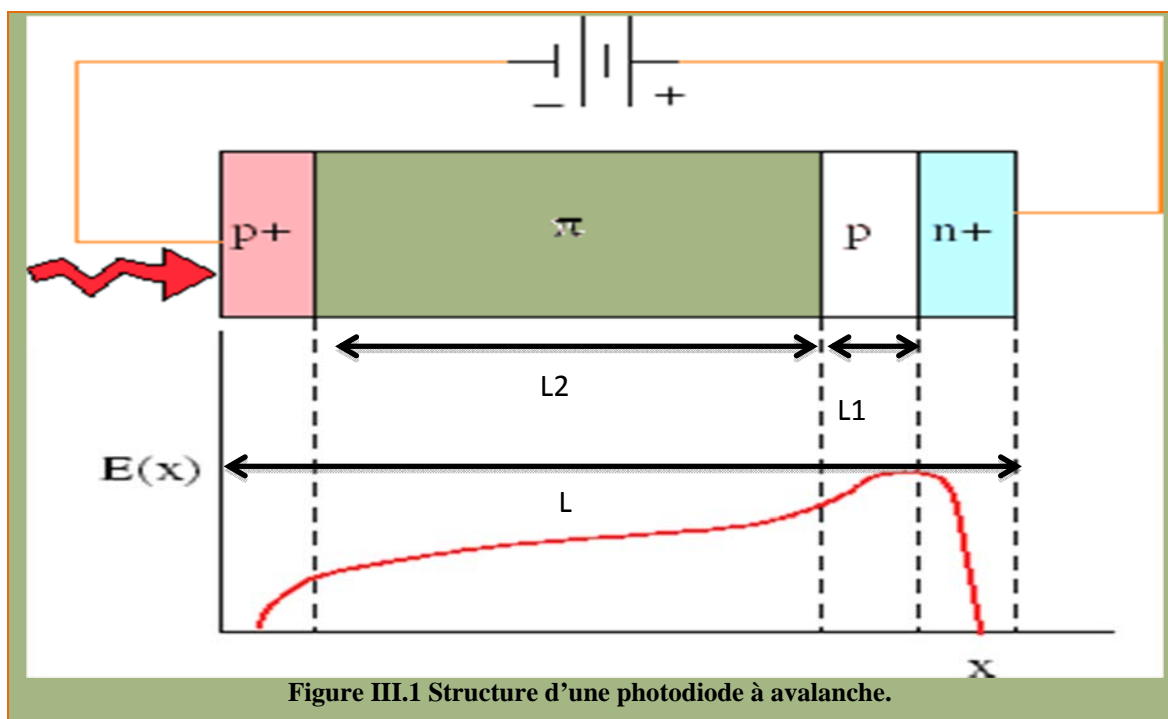
Simulation Numérique De
La Photodiode à Avalanche
à Faible Gain

❖ III.1. Introduction :

Dans cet chapitre, l'effet de la température et de la concentration de dopage avec le deux simulateurs (MATLAB et SILVACO) sur la tension de claquage, le gain de multiplication et le facteur de bruit, les caractéristique $I(v)$, des photodiodes à avalanche à jonction abrupte a été étudié pour les processus initiés par trou et par électron.

Des modèles dépendants de la température ont été développés, notamment la variation de température des coefficients d'ionisation par impact, bande interdite, concentration de porteurs intrinsèques. Les modèles développés ont été utilisés pour étudier l'impact de la température et de la concentration de dopage sur les caractéristiques du dispositif. Les modèles peuvent être implémentés dans des outils de simulation, afin d'étudier les technologies à base de photodiode à avalanche. Systèmes comprenant des effets thermiques et effets de dopage.

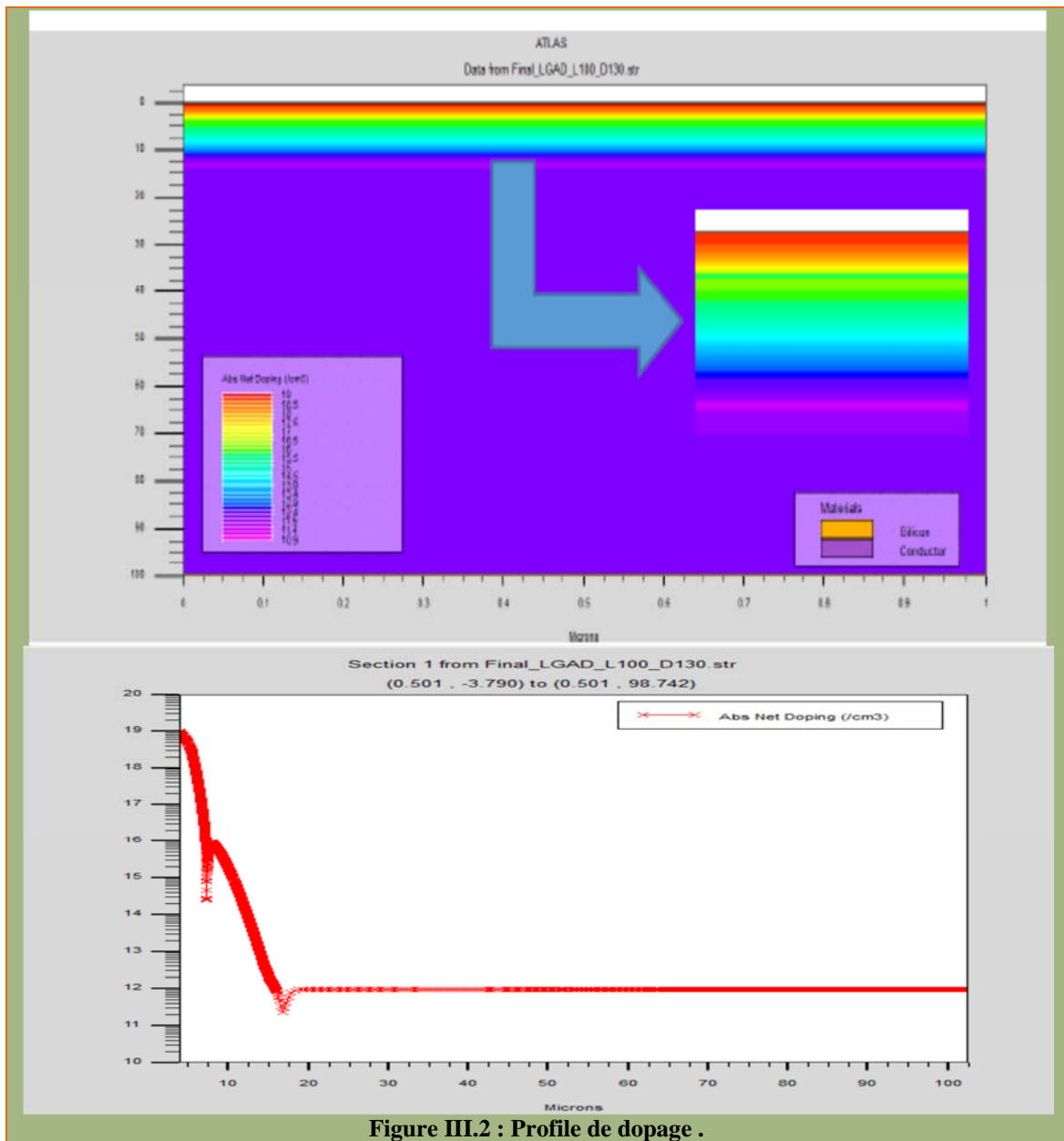
❖ III.2 Description de la structure étudiée :



La Figure III.1 représente la structure de la photodiode à avalanche à faible gain étudiée ainsi que les grandeurs géométriques associées. L représente la longueur de la photodiode ($L=100\mu\text{m}$), L_1 la longueur de la zone mince dopée en Bore (type P) considérée comme zone d'avalanche ($L_1=15\mu\text{m}$), et L_2 la longueur de la zone intrinsèque ($L_2=100\mu\text{m}$).

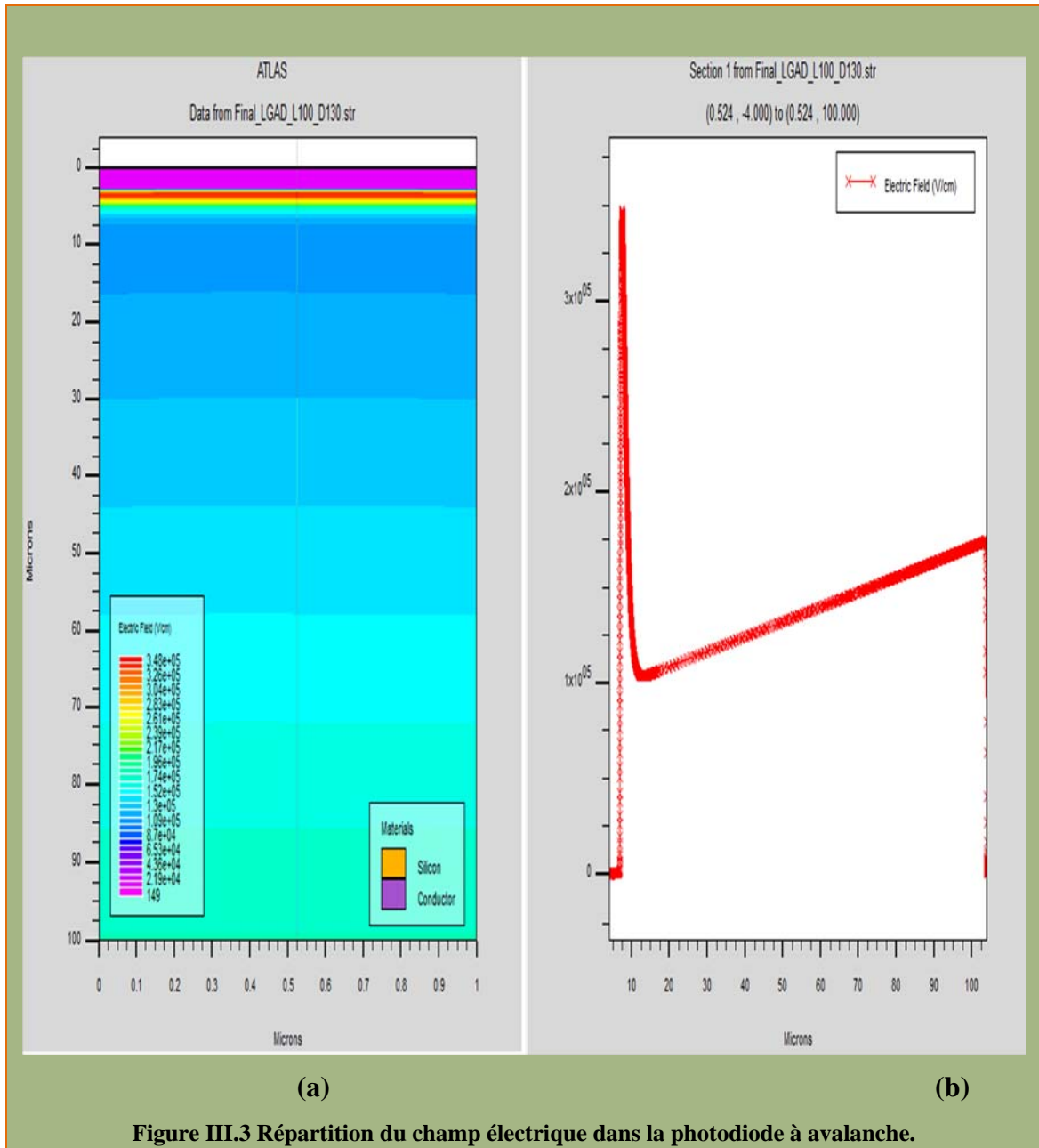
III.2.1 Profile de dopage :

Les profils de dopage sont représentés dans la figure III.1(a) vue 2D (b) coupe verticale. La configuration de la structure étudiée est constituée d'une couche intrinsèque π (en réalité, une couche p faiblement dopée de l'ordre de $2.5 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$), une couche fortement dopée P+ avec du Bore (Dopage uniforme de 10^{20}cm^{-3}), d'une couche N+ dopée au Phosphore (Dopage gaussien avec un pic de 10^{20}cm^{-3}) suivie, par ordre, par: une couche mince P dopée avec du Bore (Dopage gaussien avec un pic de 10^{16}).



III.3.2 Champ électrique et profil de potentiel :

La répartition du champ électrique et le profil de potentiel sont représentés dans la figure III.3 et la figure III.3 respectivement. L'intensité du champ et le potentiel sont maximales à la jonction N+/p. ils commencent à diminuer lorsque on s'éloigne de la jonction N+/P.



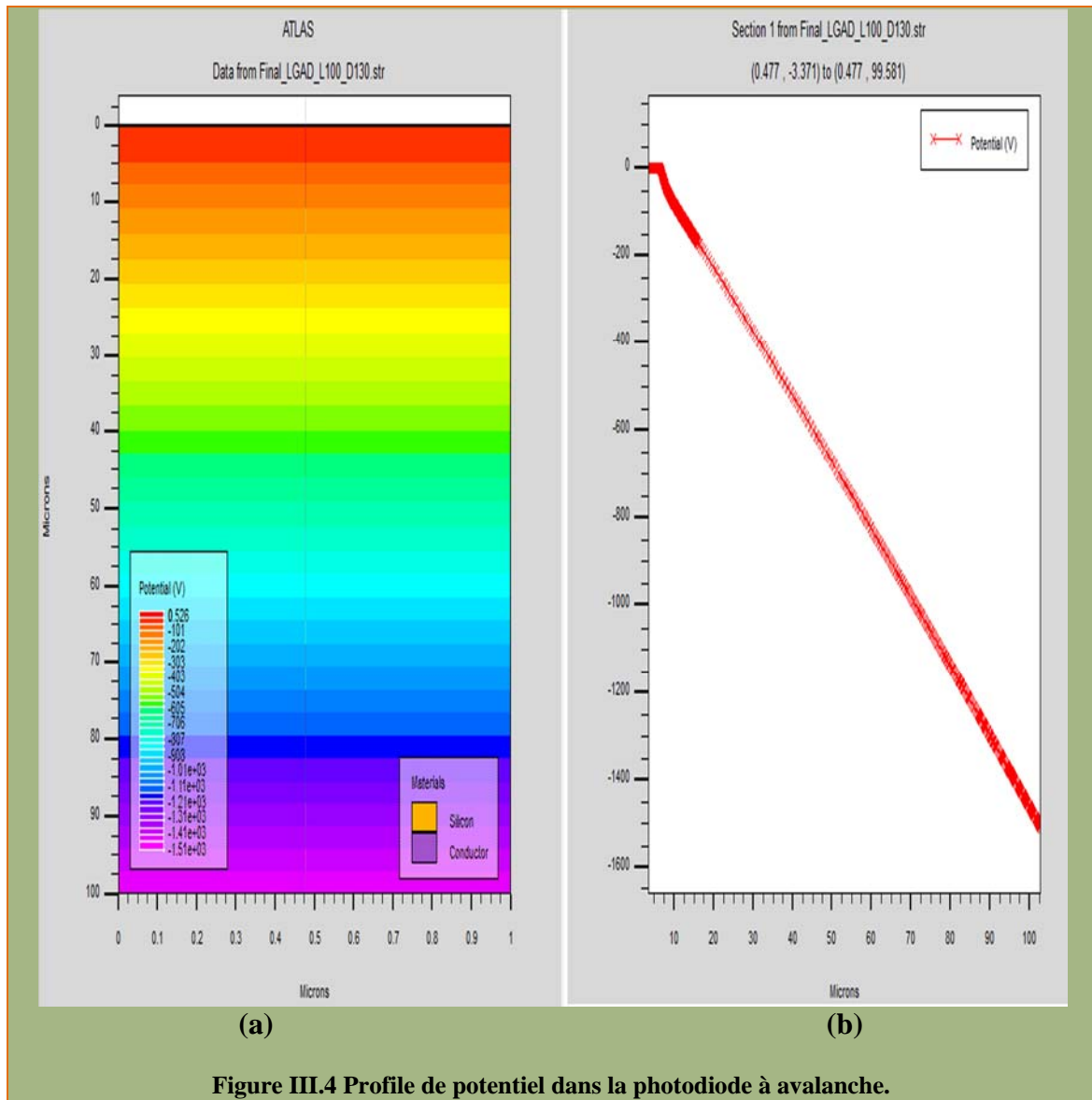


Figure III.4 Profile de potentiel dans la photodiode à avalanche.

Lorsque la photodiode est soumise sous un champ électrique suffisant, il dissocie les paires électron-trou, et propulse l'électron vers la zone N et le trou vers la zone P. Il donne naissance à un photo-courant de génération.

III.2.3 Caractéristique I-V :

La création de porteurs minoritaires dans les régions neutres N et P et la génération de paires électron-trou dans la ZCE par le rayonnement lumineux sous une polarisation inverse augmente la valeur du courant inverse d'une photodiode. Ces phénomènes sont illustrés dans la Figure III.5 :

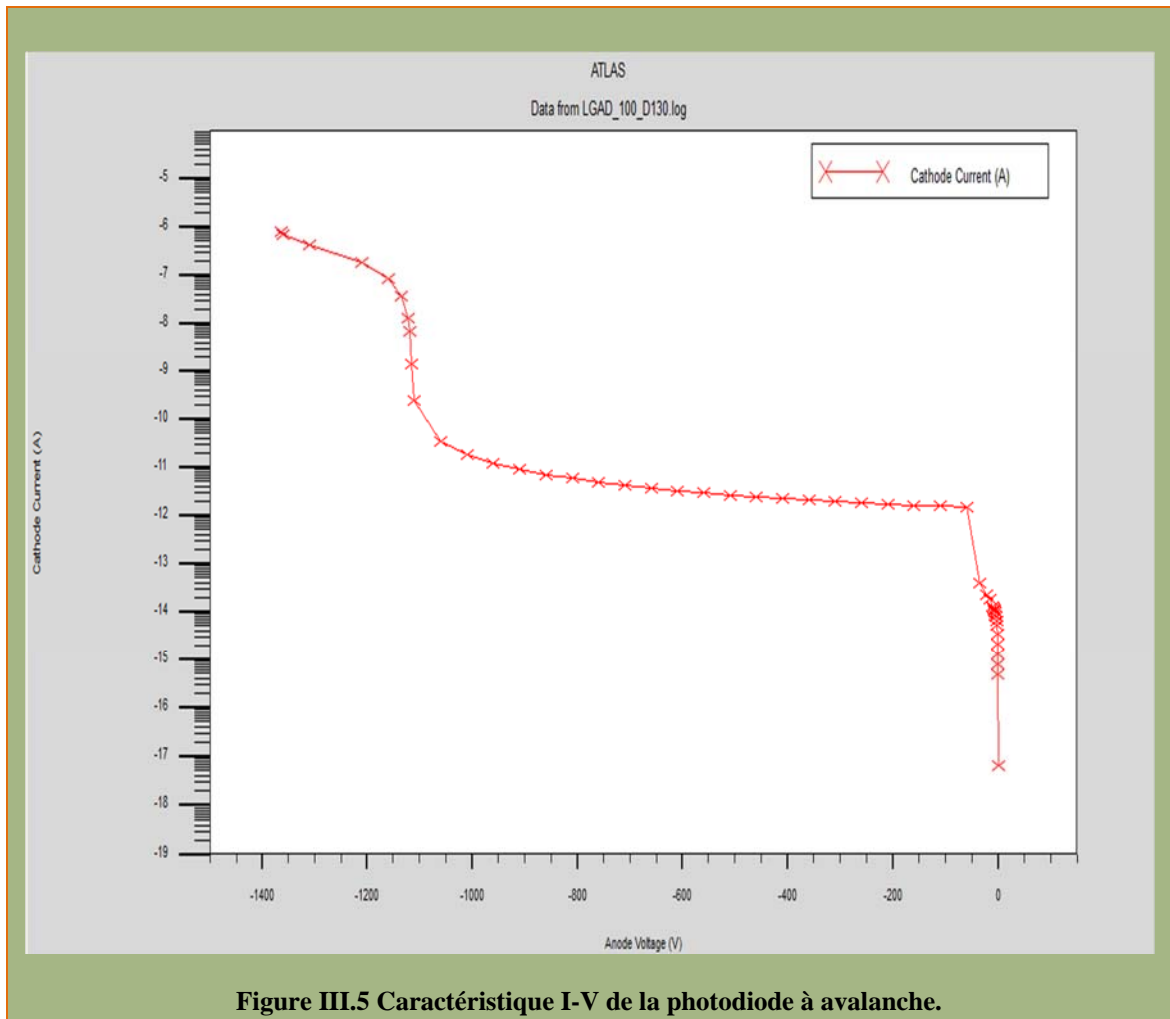


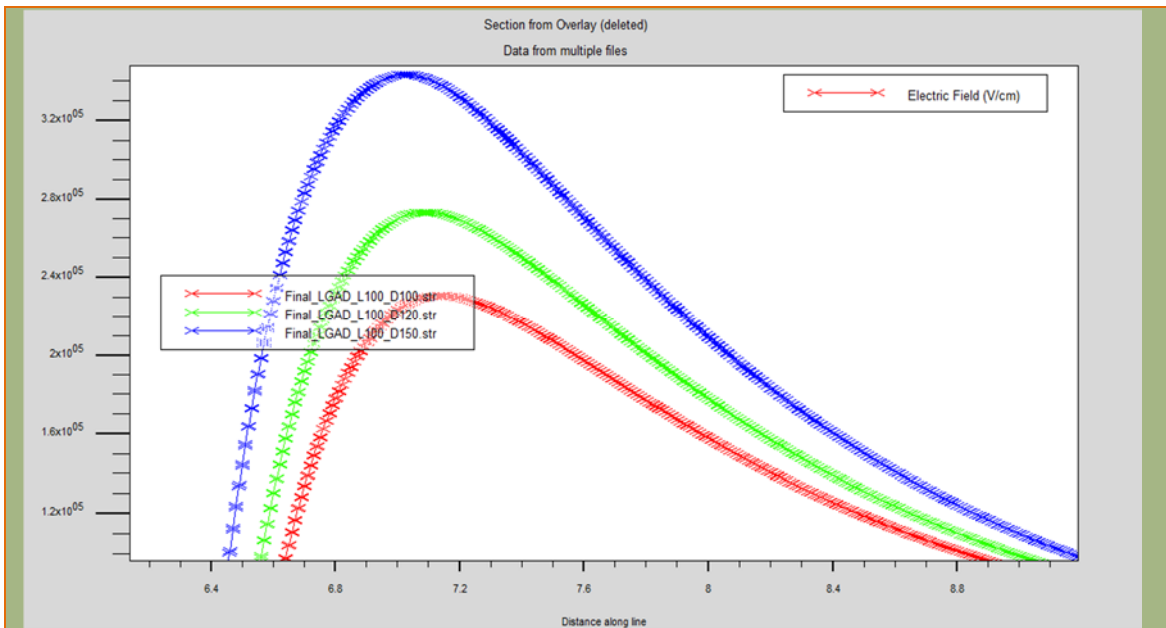
Figure III.5 Caractéristique I-V de la photodiode à avalanche.

❖ III.3 Validation du modèle numérique :

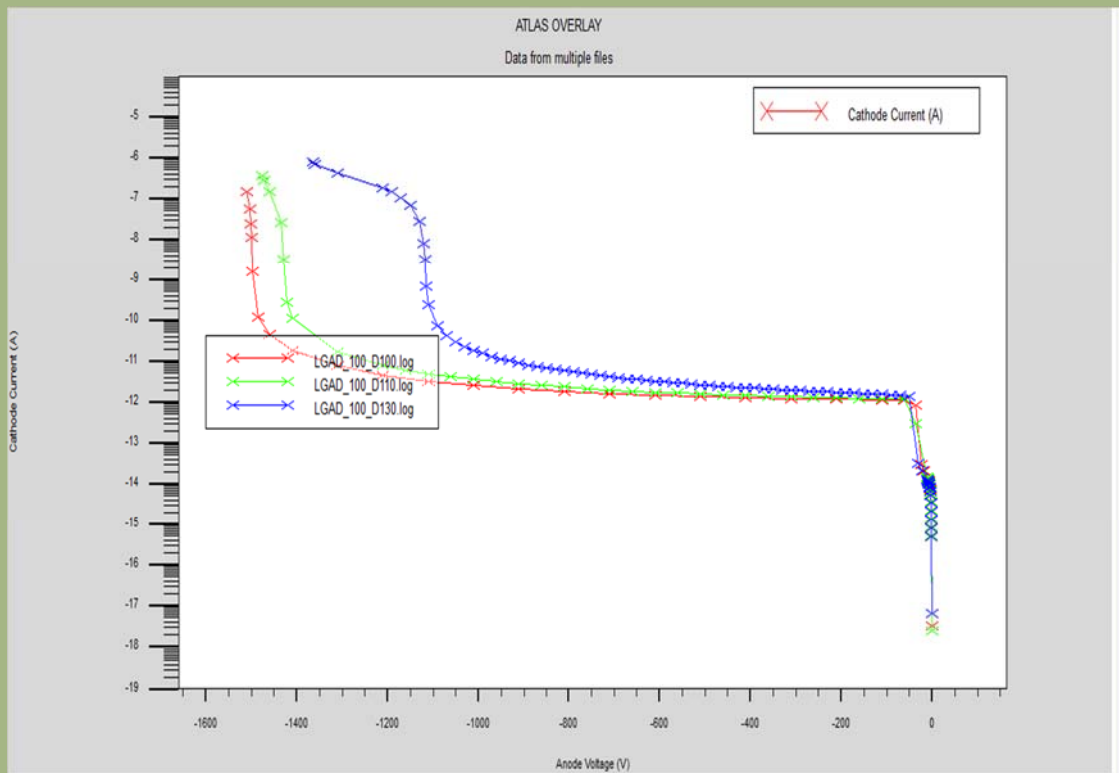
Dose[cm-2]	1.0 10 ¹³	1.1 10 ¹³	1.2 10 ¹³	1.3 10 ¹³	1.5 10 ¹³
E_{max} avec silvaco	2.29 10 ⁵	2.55 10 ⁵	2.73 10 ⁵	2.96 10 ⁵	3.43 10 ⁵
Vb avec silvaco	1502	1422	1300	1210	710
E_{max} avec matlab	2.28 10 ⁵	2.51 10 ⁵	2.72 10 ⁵	2.94 10 ⁵	3.42 10 ⁵
Vb avec matlab	1494	1405	1275	1198	709

Tableau III.1 : Comparaison des résultats de simulation obtenus par Matlab et Silvaco .

Tableau III.1 représente une comparaison entre les valeurs de la tension de claquage et le pic du champ électrique obtenues par la simulation numérique avec Matlab et avec Silvaco où un très bon accord est obtenu.



(a)



(b)

Figure III.6 Simulation silvaco (a) Pic du champ électrique (b) tension de claquage.

❖ **III.4 Influence de la température sur le gain de multiplication et facteur de bruit:**

Il est clair que le transport de charge sera affecté par la température, en raison de différentes densités d'états à différentes températures, données par l'équation de Boltzmann. la bande interdite change en fonction de la température principalement en raison des interactions électron-réseau dépendant de la température qui provoquent un décalage entre les bandes de valence (E_g augment) et de conduction, nous concluons donc d'avance que la chaleur a des effets directs et efficaces sur les changements du gain de multiplication et le facteur de bruit.

Dans cette section de la simulation, la tension de claquage, la multiplication le gain et le facteur de bruit en excès sont calculés en utilisant la théorie de McIntyre et une analyse unidimensionnelle [52] :

$$M(x) = \frac{\exp\left(-\int_x^w (\alpha - \beta) dx\right)}{1 - \int_0^w \alpha \exp\left(\int_x^w (\alpha - \beta) dx\right) dx'} \quad \text{III.1}$$

$$F(x) = 2 + \frac{M(W) \left[2 \int_0^w \alpha M^2(x) dx - 1 \right]}{M(x)} \quad \text{III.2}$$

Où α et β sont l'ionisation par impact d'électrons et de trous coefficients et W est la largeur de la région de charge d'espace. α et β Dépendent de la température et du champ électrique appliqué Influence de la température sur le gain de multiplication [53 ,54] :

$$\alpha = A_N(T) \exp\left(-\frac{B_N(T)}{E}\right) \quad \text{III.3}$$

$$\beta = A_P(T) \exp\left(-\frac{B_P(T)}{E}\right) \quad \text{III.4}$$

Où T est la température absolue et E le champ électrique. Les paramètres A_N , A_P , B_N et B_P sont une fonction de la température utilisée pour paramétrer la dépendance de α et β en fonction de la température, ainsi que la dépendance du champ électrique. A_N , A_P , B_N et B_P sont exprimés en tant que [55 ,54] :

$$B_{n.p}(T) = b_{n.p} \left(1 + d_{n.p}(T - 300) \right) E^{n/n.p} \quad \text{III.5}$$

$$A_{n.p}(T) = a_{n.p} \left(1 + C_{n.p}(T - 300) \right) \quad \text{III.6}$$

Dans cette étude de simulation, nous sommes concentrés sur les simulateurs MATLAB pour étudier l'impact de la température sur le gain de multiplication, dans la plage de température de [293°K-303°K], afin de montrer: Variation de gain en fonction de la température pour différentes valeurs de dose.

Le tableau III. 2 ci-dessous résume tous les résultats obtenus par le simulateur Matlab, en montrant l'évolution des valeurs du gain de multiplication et du facteur de bruit, conformément au différent changement de concentration de dose de bore [1.10¹³cm⁻² à 1.5.10¹³cm⁻²] et valeurs de température [293°K-303°K].

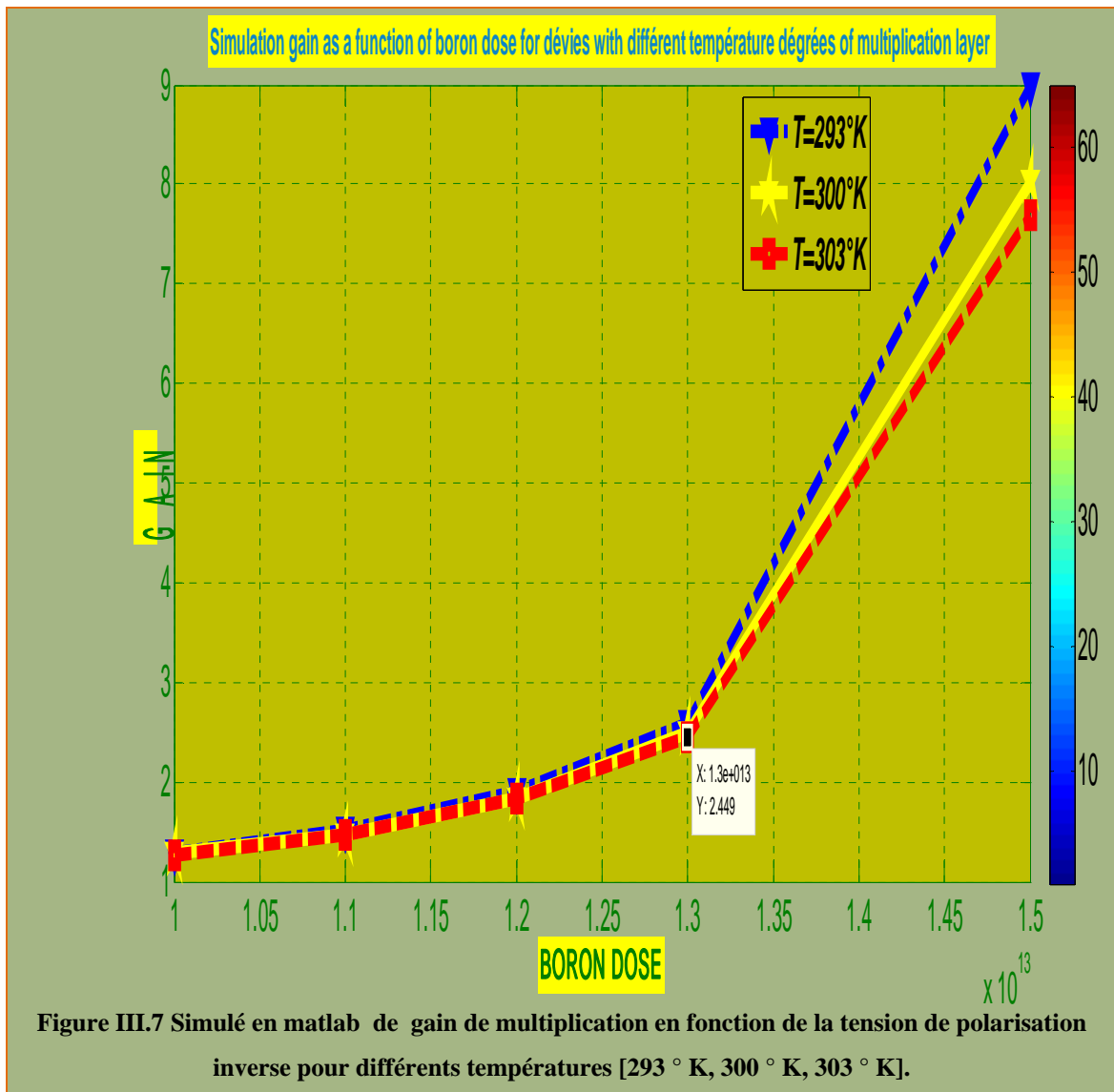
DOSE[cm-2]	TEMPURATEUR	GAIN	FACTEUR DE BRUIT
1* 10 ¹³	293°K	1.2926	1.2297
	300°K	1.2741	1.2180
	303°K	1.2676	1.2138
1,1* 10 ¹³	293°K	1.5083	1.3480
	300°K	1.4747	1.3315
	303°K	1.4644	1.3262
1,2* 10 ¹³	293°K	1.9062	1.5108
	300°K	1.8422	1.4878
	303°K	1.8221	1.4803
1,3* 10 ¹³	293°K	2.5839	1.7091
	300°K	2.4835	1.6830
	303°K	2.4490	1.6738
1,5* 10 ¹³	293°K	8.9932	2.8351
	300°K	8.0340	2.6814
	303°K	7.6986	2.6271

Tableau III.2 Résumé des résultats de simulation en Matlab pour le gain et facteur de bruit dans la région de multiplication pour différents doses de bore et des températures, L =100µm, Vpol=500V.

III.4.1 Influence de température sur le gain de multiplication :

La figure III.7 représente la variation du gain de multiplication en fonction de la tension de polarisation inverse pour différents valeurs de températures [293 ° K, 300 ° K, 303 ° K].

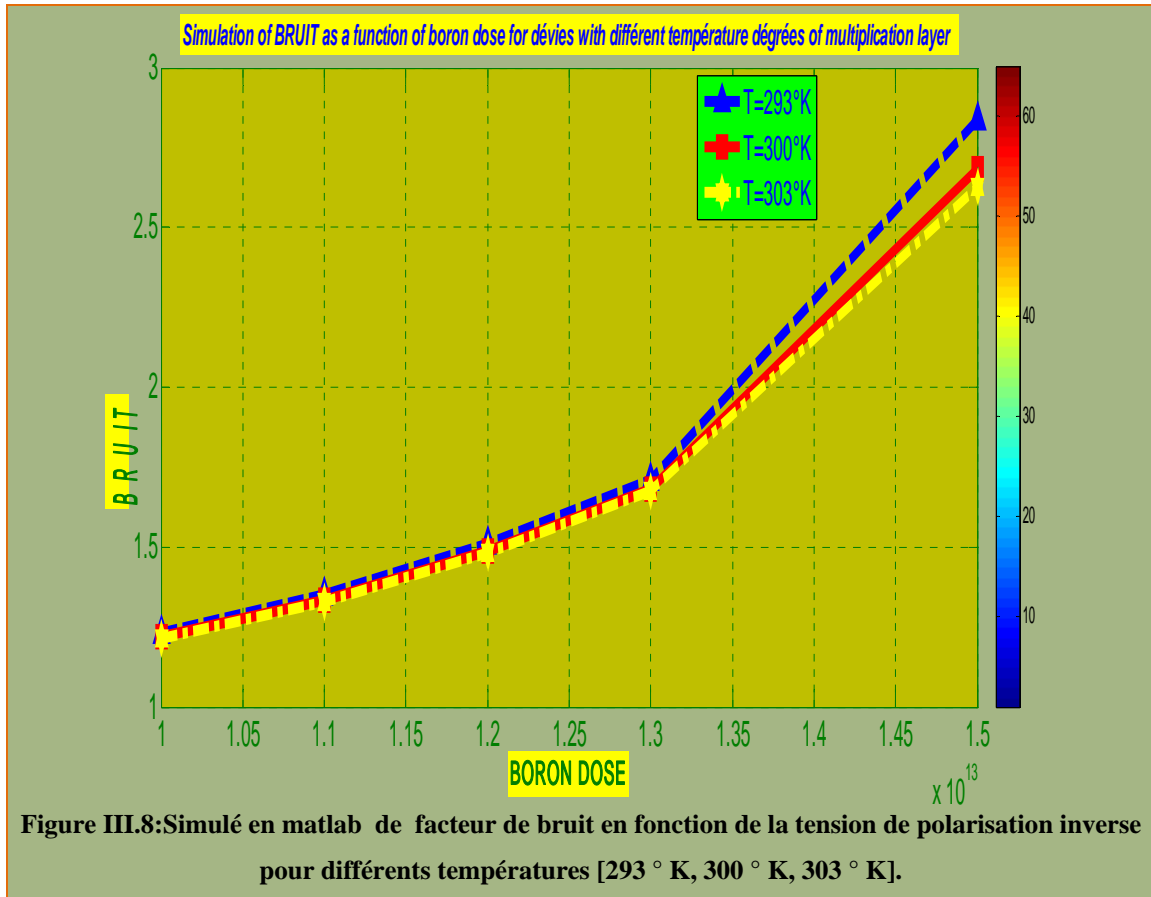
Cette figure montre que pour toute valeur de tension de polarisation inverse, le gain de multiplication est proportionnel à différentes valeurs de température [par exemple : pour une tension de polarisation $v_{bais}=500V$ et une dose de Bore Dose= $1.5.10^{13}(V)$ à $T=293^{\circ}K$, le gain égal à 9. cependant pour la même valeur de tension inverse à $T=303^{\circ}K$, le gain égal à 7.7).



III.4.2 Influence de température sur le facteur de bruit :

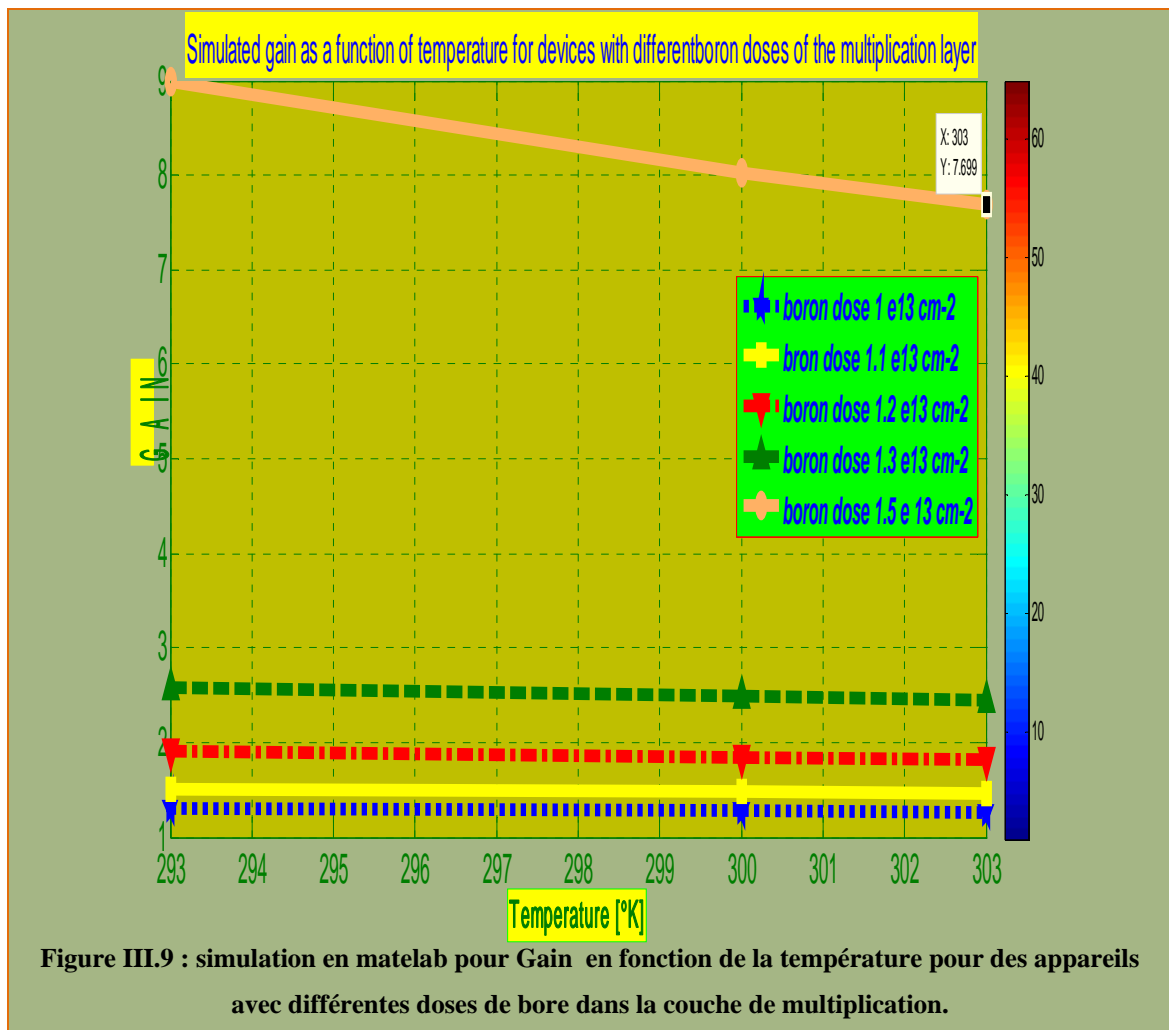
Dans cette étude de simulation, nous sommes concentrés sur les simulateurs MATLAB ET CILVACO pour étudier impact de la température sur le facteur de bruit, dans la plage de température de [293°K-303°K], afin de montrer: Variation de gain en fonction de la température pour différentes valeurs de dose.

Figure III.8 représente une Simulation du gain de multiplication en fonction de la tension de polarisation inverse pour différents températures [293 ° K, 300 ° K, 303 ° K].



III.4.3 Sensibilité du gain de multiplication à la température :

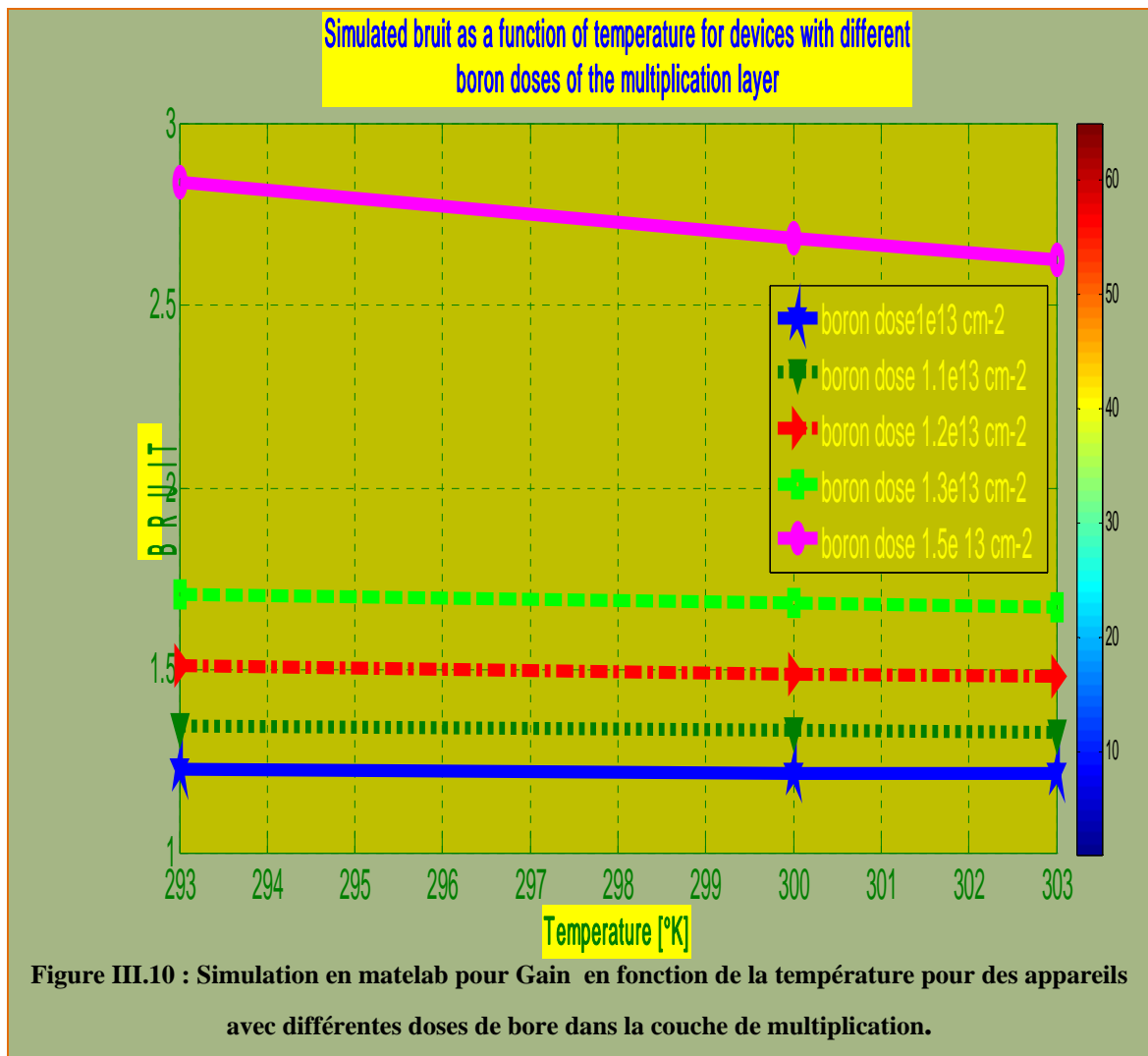
Comme le montre la Figure III.9 une dépendance de température approximativement linéaire est observée à $V_{bias} = 500$ V pour tous des doses de bore comprises dans la plage [$1,0 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ à $1,5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$], où la variation de gain de multiplication sur la température est fortement réduite pour les faibles doses de bore. Sur D'autre part, l'effet de la température sur la valeur du gain de multiplication est plus important pour les fortes doses de bore.



Dans les semi-conducteurs à large bande interdite tels que Si et GaAs, la température réduite abaisse le nombre d'événements de diffusion de phonons conduisant à une plus grande population de porteurs chauds qui augmente les événements d'ionisation d'impact. D'autre part, dans les matériaux à bande interdite étroite, dont l'ionisation par impact peut se produire à des énergies proches de E_g [55,56].

III.4.4 Sensibilité du facteur de bruit à la température :

Comme le montre la Figure III.10, la dépendance de la température est approximativement linéaire est observée à $V_{bias} = 500$ V, pour des concentrations de dopage dans une plage de $[1.0 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ à $1.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}]$, le facteur de bruit en excès augmente légèrement avec la température et diminue pour les faibles doses de Bore. De plus, à une température de fonctionnement, le facteur de bruit est réduit lorsqu'on diminue le niveau de dopage (pour les faibles doses de Bore) dans la région de multiplication.

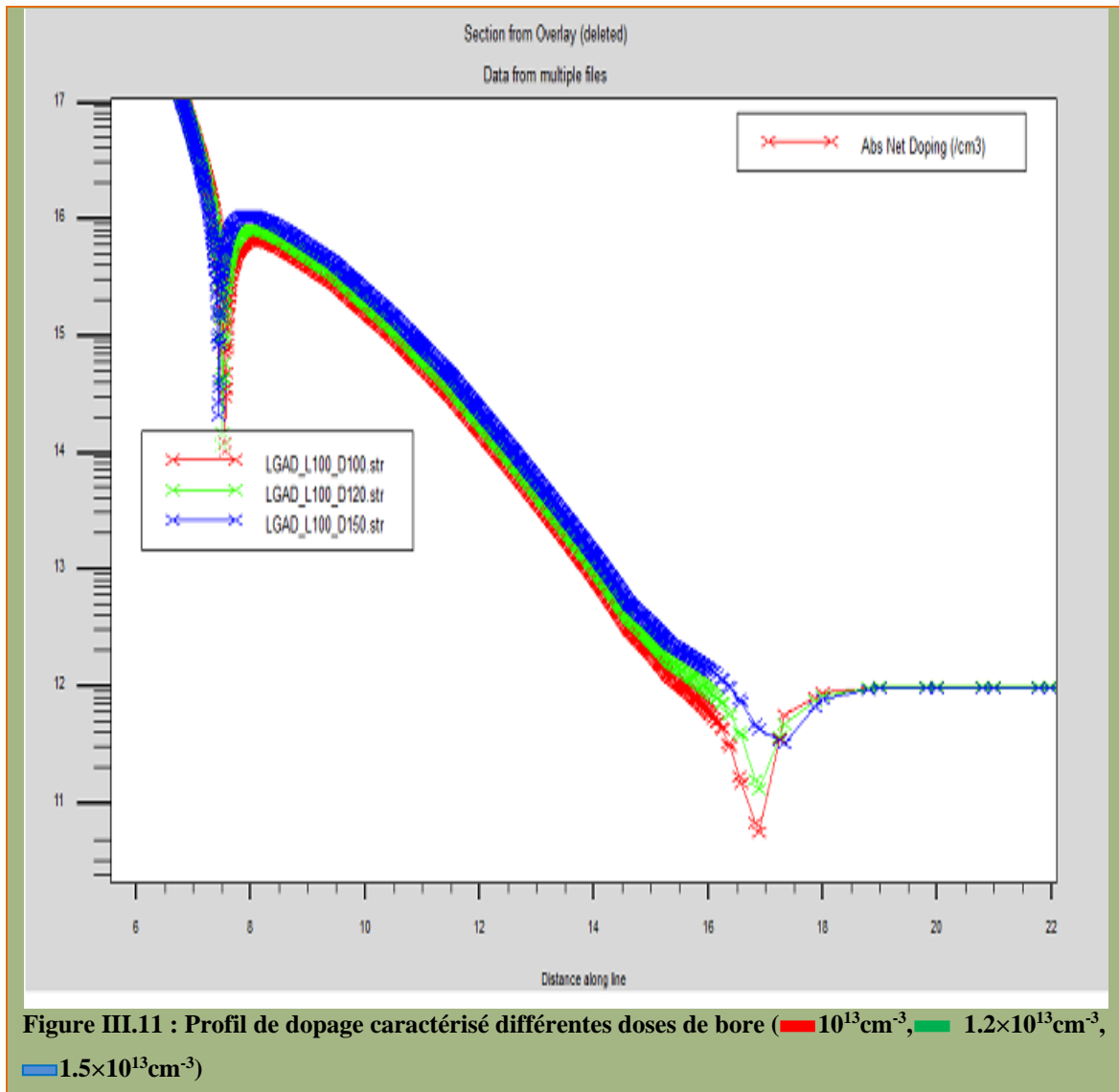


Les résultats de ces travaux soulignent la nécessité de maintenir la dose de Bore aussi faible que possible afin de garantir l'immunité contre les variations de température de ces structures.

❖ III.5.Influence de dopage :

Dans cette section, la tension de claquage, le gain de multiplication et le facteur de bruit sont calculés en utilisant le MATLAB et SILVACO, afin d'évaluer les performances d'APD à différents doses de Bore dans la zone de multiplication.

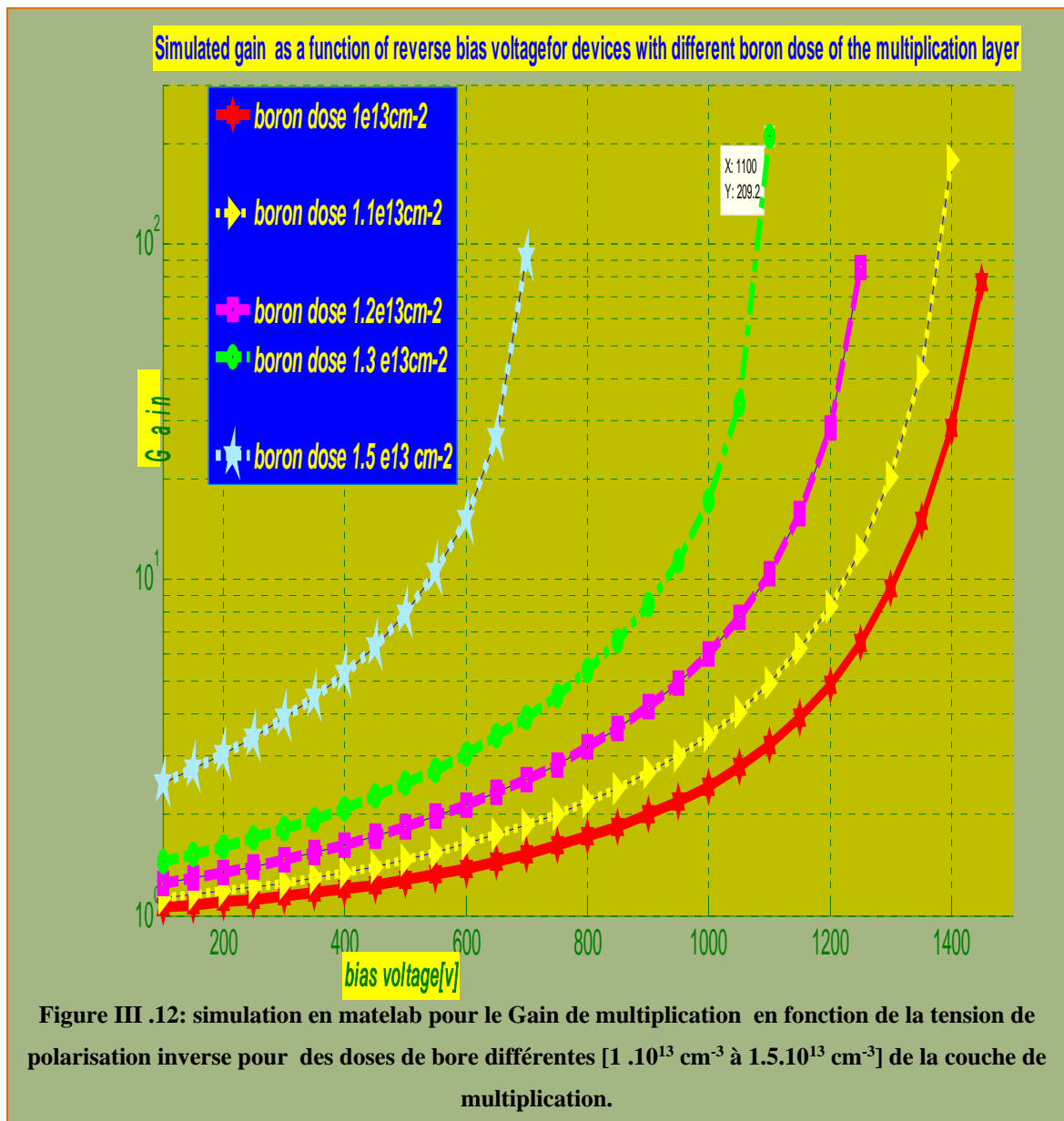
Notre structure étudiée est simulée avec le simulateur Matlab de manière très précise pour obtenir des résultats significatifs, ainsi que pour le simulateur TCAD. À cet égard, nous avons simulé cette structure à l'aide du simulateur silvaco pour obtenir le profil de dopage dans toute la structure, tel qu'illustré dans la Figure III.11, avec différentes doses de bore (10^{13} cm^{-2} - $1.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$).



❖ III.5.1. Influence de dopage sur le gain de multiplication :

Figure III.12. Représenter des simulations Gain de multiplication en fonction de la tension de polarisation inverse pour des doses de bore différentes [$1 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$, 1.2×10^{13} à $1.5 \cdot 10^{13}\text{cm}^{-3}$] de la couche de multiplication.

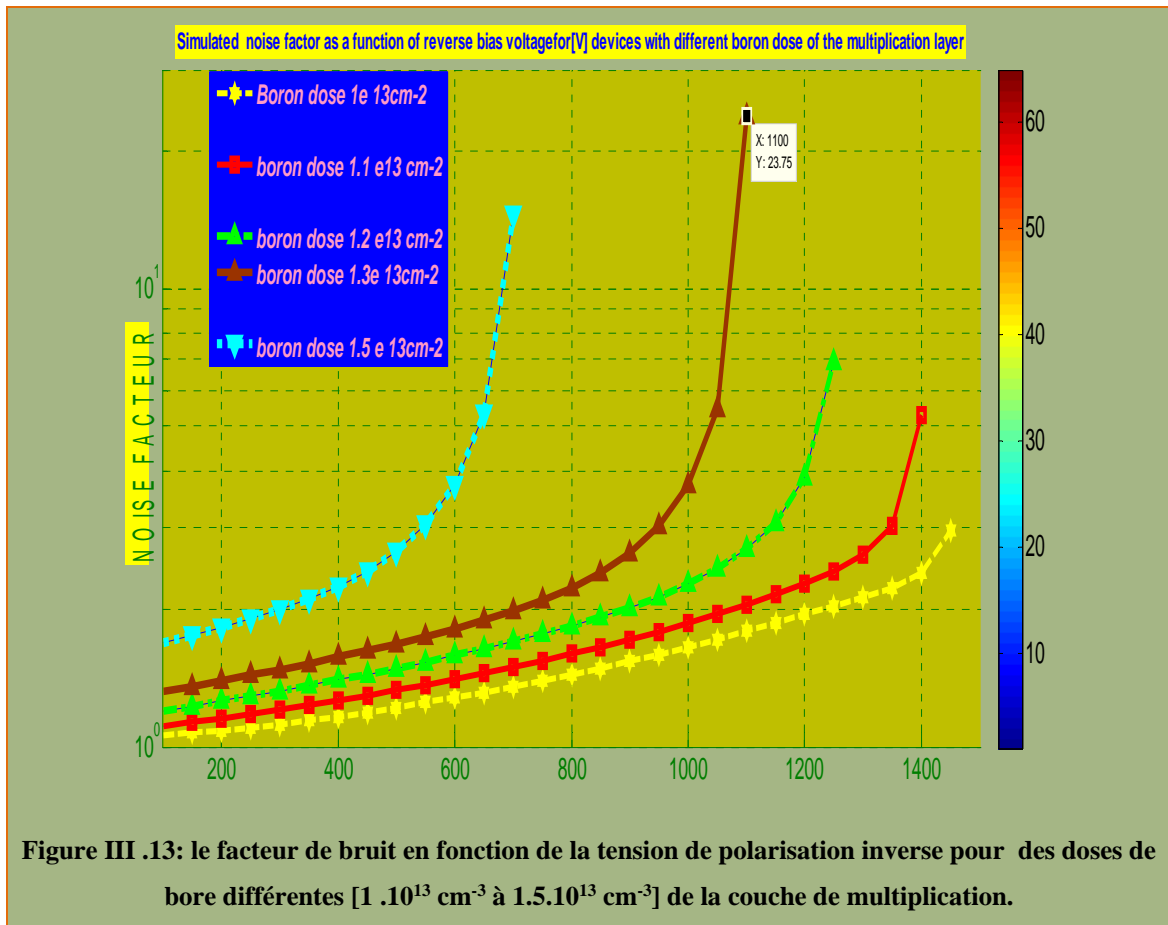
Il montre que le gain de multiplication reste presque proche de l'unité jusqu'à des tensions de polarisation inférieures, même pour une dose élevée de bore, augmente progressivement avec les tensions de polarisation en augmentant la dose de bore et en atteignant les valeurs les plus élevées de gain. Tension de claquage. valeurs de claquage.



Ces résultats scientifiques sont corroborés par nos conclusions sur la corrélation entre la concentration du dopage de bore et une augmentation de la valeur du gain de multiplication.

III.5.2. Influence de dopage sur le facteur de bruit :

Figure III .13 représentée des simulations facteur de bruit en fonction de la tension de polarisation inverse pour des doses de bore différentes [$1 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ à $1.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$] de la couche de multiplication.



A partir de cette figure, nous remarquons que le facteur de bruit reste presque proche de l'unité à des tensions de polarisation inférieures, même pour une dose élevée de Bore, et commence à augmenter progressivement avec les tensions de polarisation en augmentant la dose de bore et en atteignant des valeurs les plus élevées de facteur de bruit près de la tension de claquage.

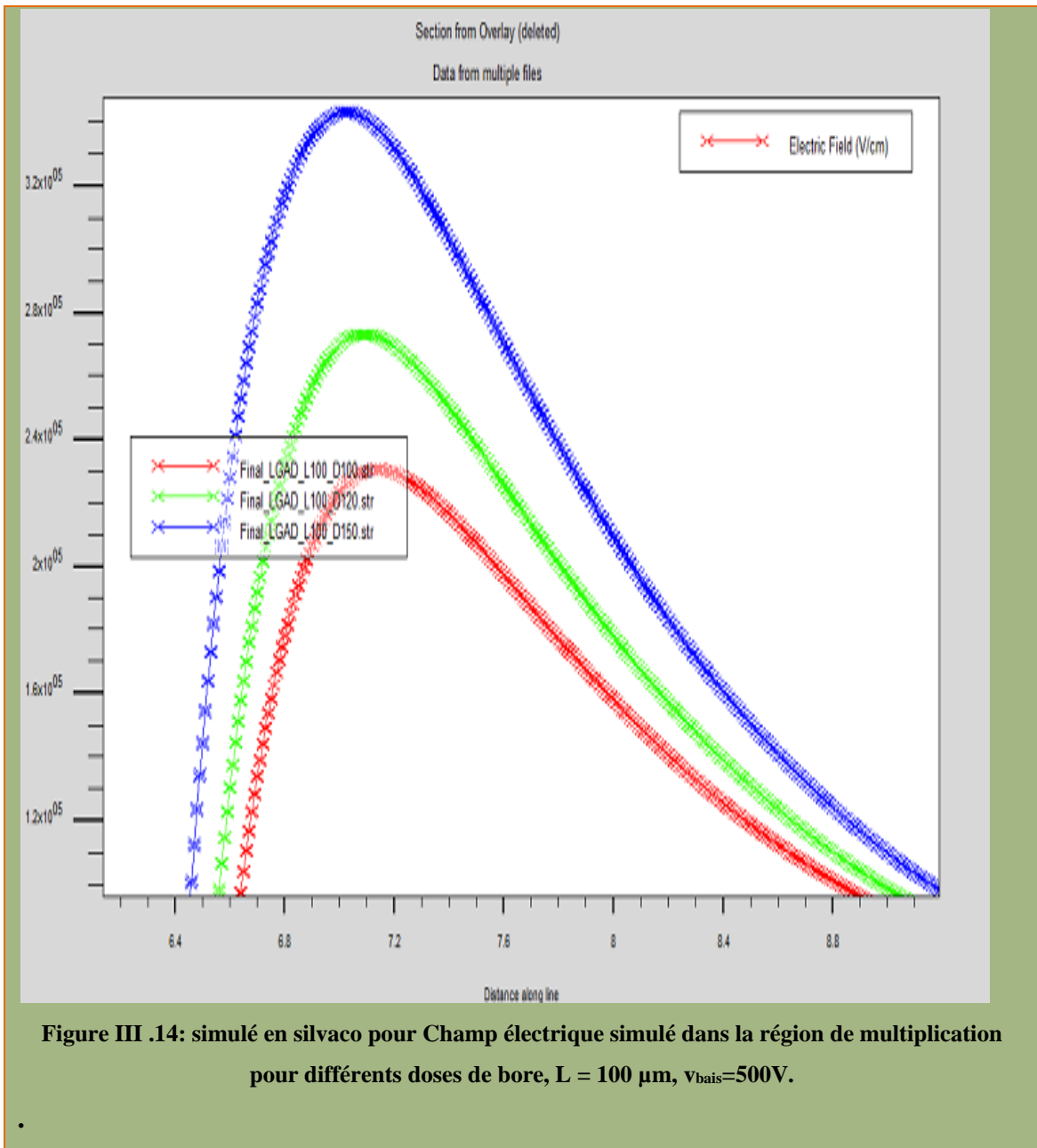
III.5.3. Influence de dopage sur les caractéristiques électriques :

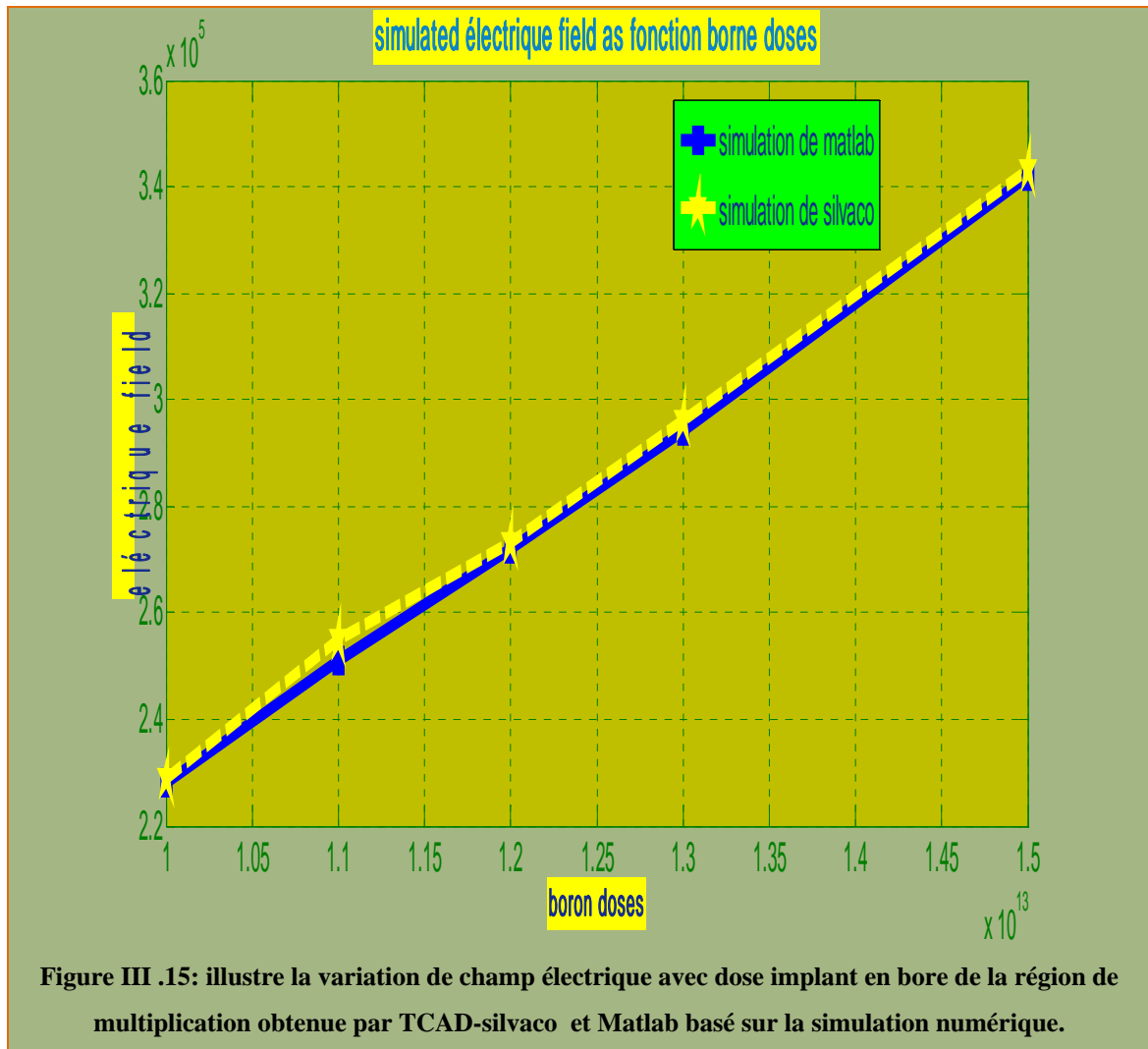
➤ III.5.3.1. Influence de dopage sur le champ électrique:

Les deux figures III.14, figure III.15 et ci-dessous sont remplies de droites Champ électrique simulé dans la région de multiplication par simulateur Silvaco pour divers doses de bore, $L = 100\text{ }\mu\text{m}$, et tension de polarisation inverse ($v_{\text{bais}}=500\text{v}$).

Les résultats obtenus avec Silvaco étaient cohérents et très proches au simulation Matlab, Alors, les deux simulations ont montré que le profil de distribution du champ électrique dans la région de multiplication des APD est identique pour différentes dose de Bore. La figure III.14 montre qu'une augmentation de la dose du Bore tend à augmenter le pic du champ électrique autour de la jonction N^+ / P . En raison de la faible

largeur de la zone de champ élevé à la région de multiplication, le pic du champ électrique doit être au moins 3×10^5 V / cm pour un gain significatif.

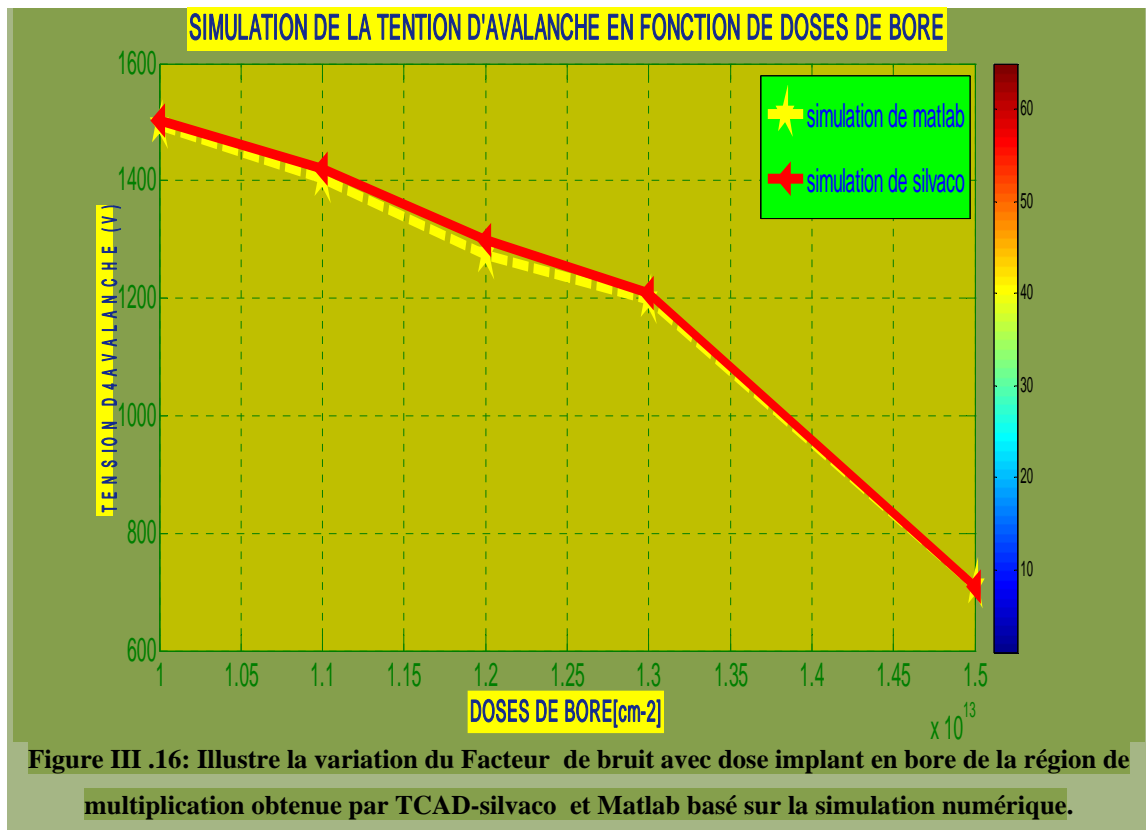




➤ **III.5.3.2. Influence de dopage sur LA TENSION D’AVALANCHE dans la région de multiplication :**

Figure III .16 ci-dessous représentée la simulation en les deux simulateur (MATLAB et SILVACO) au variation de tension d’avalanche dans la région de multiplication sous l'effet de différent doses de bore pour divers doses de bore, $L = 100 \mu\text{m}$, $V_{\text{bais}}=500\text{V}$.

Montre de cette simulation que la région de multiplication est très sensible à la dose d’implant de bore, où un peu variation de la valeur de la dose pour la magnitude 10^{13} conduit à provoquer des changements énormes dans les valeurs de tension de claquage.



❖ III.6 CONCLUSION :

Dans cette chapitre, un modèle dépendant de la température pour la simulation de la tension de claquage, du gain de multiplication, Le facteur de bruit, et caractéristique I-V dans les APD en silicium est présenté. On constate que augmentation du niveau de dopage dans la région de multiplication de la DPA réduit le coefficient de température de gain et de bruit.

ce pour ca la nécessité de maintenir la dose de Bore aussi faible que possible afin de garantir l'immunité contre les variations de température de ces structures il très important. De plus, la sensibilité à la température de la tension de claquage est plus prononcée pour les faibles concentrations de dopage. C'est pour notez que cette investigation peut être étendue aux 2D et 3D domaines de simulation et appliqués à différents semi-conducteurs matériaux (par exemple: SiGe). Comme les modèles de terrain locaux sont connus pour surestimer le facteur de bruit excessif APD [52], la valeur de F fournie par le modèle proposé peut être considéré comme la pire estimation. Modèles non locaux.

CONCLUSION GENERALE

III.7 Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons présenté une étude de simulation d'un détecteur de silicium appelé détecteurs d'avalanche à faible gain. Le profil de dopage de la photodiode à avalanche dans la région de multiplication est le paramètre technologique le plus critique à être ajusté, affectant la tension de claquage, gain-tension caractéristiques et le facteur de bruit.

Pour mieux comprendre le mécanisme de multiplication, des simulations numériques basées sur le simulateur Matlab et Silvaco ont été réalisées pour étudier la conception du détecteur à faible gain.

Dans ce contexte, un calcul numérique basé sur le calcul Newton-Raphson a été proposé pour estimer le potentiel électrostatique et la distribution du champ électrique. L'impact du profil de dopage, dans la couche de multiplication, et la température sur les caractéristiques électriques de la photodiode a été étudié pour différentes structures APDs prenant en compte les implantations de Bore à différentes doses.

Les résultats démontrent que le gain de multiplication, le bruit et la sensibilité de la dose du Bore dépend du niveau de la tension de polarisation inverse. En outre, l'immunité du dispositif contre la variation de la température est améliorée en diminuant la dose du Bore implantée dans la couche de multiplication. Cependant, cette conception de structure ne devrait pas être très bonne, avec une tension de polarisation assez faible en raison de sa multiplication d'avalanche indésirable, mais il peut être considérablement amélioré en intégrant des méthodes d'optimisation.

Le premier chapitre de ce mémoire consiste à donner un aperçu de quelques généralités sur les photodiodes telles que : le principe de fonctionnement des photodiodes, leur caractéristique électriques, ensuite, donne les caractéristiques les plus important de la photodiode que nous étudierons (La Photodiode à Avalanche) telles que: le gain de multiplication et le facteur de bruit.

Le deuxième chapitre du ce mémoire a été consacré à la présentation du logiciel de simulation TACD-SILVACO, et l'exploration de ces modules particulièrement ATLAS pour la simulation du comportement électrique des composants optoélectroniques, et comment l'utiliser pour développer des programme de simulation

qui permettant le calcul numérique des caractéristiques courant-tension des photodiodes à avalanche.

Dans le troisième chapitre, les résultats d'une simulation numérique d'un dispositif appelée détecteur à avalanche à faible gain ont été présentés. La dose de Bore p^+ dans la zone d'avalanche, qui présente le défi technologique que pose la conception des structures APDs, est modifiée afin de montrer son effet sur les caractéristiques de tension de claquage, gain-tension et bruit-tension. Dans ce contexte, des simulations numériques sont effectuées pour l'ajustement de la conception des APDs. Nous avons étudié l'impact du profil de dopage p^+ , dans la région de multiplication, sur les performances électriques de l'APD pour certaines structures de dispositifs candidats, compte tenu l'implantation de Bore à différentes doses. De plus, les simulations de ce dispositif permettent de prédire la dépendance en température du gain de multiplication et du facteur de bruit dans la plage de [293 ° K à 303K °] afin de mettre en évidence l'immunité du dispositif contre les variations de température pour différentes valeurs de dose de Bore.

REFERENCES

- [1] O. Bendrihem, « effet des défauts sur les caractéristiques électriques du transistor BMFET. à base de 4H-Sic », mémoire Master, Université Mohamed khider Biskra, 2014.
- [2] T. Kaneda, H. Fukuda, T. Mikawa, Y. Banba, Y. Toyama, and H. Ando, "Shallow junction p+-n germanium avalanche photodiodes (APD's)," Appl. Phys. Lett., vol. 34,no. 12, p. 866, 1979.
- [3] : A. Bouafia, « Modélisation et optimisation des paramètres électriques des photodiodes d'avalanche », Mémoire Master, Université de M'sila, 2016.
- [4] Saadi. Leila, "Optimisation Multi-Objectifs par Programmation Génétique", l'université de Batna, 08 Juillet 2007.
- [5] Audrey Corbeil Therrien, « modélisation de photodétecteurs à base de matrices de diode ».
- [6]<http://www.univ-usto.dz/thesesenligne/docnum.php?explnumid=2847>
- [7] brahim haraoubia, la jonction [PN], 2016.
- [8] L. Menguy, Diffusion de particules, octobre 2017.
- [9] <https://link.springer.com/article/10.1007/BF03021150> .
- [10] <https://perso.univ-st-etienne.fr/destoucn/Enseignements/CM-TD-CaptOpt>
- [11] <http://qwork.tudelft.nl/~schouten/linload/phdiode>
- [12] JB. Desmoulins , " éléments de physique des isolants, des semi-conducteurs et quelques exemples de structures de composants" , janvier 2016.
- [13] A. Labouret, M. Viloz, Energie solaire photovoltaïque, 3ème édition, DUNOD, Paris, 2006.
- [14] <https://nptel.ac.in/courses/117101054/downloads/lect9>
- [15] <http://www.braikart.com/article/Principle-of-operation-of-Photo-Detector-6898/>
- [16] <https://www.globalspec.com/reference/21447/160210/chapter-14-4-2-schottky-photodiode>.
- [17] https://www.electronicsnotes.com/articles/electronic_components/diode/photodiode-detector-schottky.php.
- [18] M.Christian Rumelhard , Modélisation et Evaluation des Performances des Phototransistors Bipolaires à Hétérojonction SiGe/Si , (CNAM, Paris) , Décembre 2006.
- [19] R. Mecheref, étude photo détecteur ULTRA-VOLET à bases d'hétérostructure ,2005.

- [20] S.S. Murtaza, H. Nie, J.C. Campbell, J.C. Bean, L.J. Peticolas, "Short-Wavelength, HighSpeed, Si-Based Resonant-Cavity Photodetector", in IEEE Photonics Technology Letters, Vol.8, No.7, pp927-929, July 1996 .
- [21] K. Kishino, M.S. Unlu, J.I. Chyi, J. Reed, L. Arsenault, H. Morkoc, "Resonant cavityenhanced (RCE) photodetectors", in IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.27, No.8, pp2025-2034, Aug. 1991.
- [22] G. Kinsey, C. Lenox, H. Nie, J.C. Campbell, B.G. Streeman, "Resonant-Cavity Photodetector with Integrated Spectral Notch Filter", in IEEE Photonics Technology Letters, Vol.10, No.8, pp1142-1143, Aug. 1998.
- [23] I.H. Tan ; J.J. Dudley, D.I. Babic, D.A. Cohen, B.D. Young, E.L. Hu, J.E. Bowers, B.I. Miller, U. Koren, M.G. Young, "High quantum efficiency and narrow absorption bandwidth of the wafer-fused resonant In_{0.53}Ga_{0.47}As photodetectors", in IEEE Photonic Technology Letters, Vol.6, No.7, pp811-813, July 1994.
- [24] C.C. Barron, C.J. Mahon, B.J. Thibeault, G. Wang, W. Jiang, L.A. Coldren, J.E. Bowers, "Resonant-cavity-enhanced pin photodetector with 17 GHz bandwidth-efficiency product", inIEEE Electronics Letters, Vol.30, No.21, pp1796-1797, Oct. 1994 .
- [25] K.Kato,"Ultrawide-Band/High-Frequency Photodetectors", in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.47, No.7, pp1265-1281, Jul. 1999.
- [26] T. Ishibashi, N. Shimizu, S. Kodama, H. Ito, T. Nagatsuma, T. Furuta, "Uni-travelingcarrier photodiodes", in Technical Digest on Ultrafast Electronics and Optoelectronics, OSA TOPS, Vol.13, pp. 83-87, 1997.
- [27] N. Shimizu, N. Watanabe, T. Furuta, T. Ishibashi, "High-speed InP/InGaAs uni-travelingcarrier photodiodes with 3-dB bandwidth over 150 GHz", in 55th Annual Device ResearchConference Digest, pp164-165, 23-25 June 1997.
- [28] T. Pearsall, M. Piskorski, A. Brochet, J. Chevrier, "A Ga_{0.47}In_{0.53}As/InP heterophotodiode with reduced dark current", in IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.17, No.2, pp255-259, Feb. 1981.
- [30] G.A. Davis, R.E. Weiss, R.A. LaRue, K.J. Williams, R.D. Esman, "A 920-1650-nm high-current photodiode", in IEEE Photonic Technology Letters, Vol.8, No.10, pp1373-1375, Oct. 1996.

- [31] N. Shimizu, N. Watanabe, T. Furuta, T. Ishibashi, "InP-InGaAs uni-traveling-carrier photodiode with improved 3-dB bandwidth of over 150 GHz", in IEEE Photonic Technology Letters, Vol.10, No.3, pp412-414, March 1998.
- [29] G.A. Davis, R.E. Weiss, R.A. LaRue, K.J. Williams, R.D. Esman, "A 920-1650-nm high-current photodiode", in IEEE Photonic Technology Letters, Vol.8, No.10, pp1373-1375, Oct. 1996.
- [30] N. Shimizu, N. Watanabe, T. Furuta, T. Ishibashi, "InP-InGaAs uni-traveling-carrier photodiode with improved 3-dB bandwidth of over 150 GHz", in IEEE Photonic Technology Letters, Vol.10, No.3, pp412-414, March 1998.
- [31] These_F_Moutier_HPT_SiGe_CHP.
- [32] M. Christian Rumelhard (CNAM Paris), Modélisation et Evaluation des Performances des Phototransistors Bipolaires à Hétérojonction SiGe/Si pour les Applications Optique-microondes Courtes Distances, 2006 .
- [33] cova,s.et ai,'Avalanche photodiodes (APDs) ,2011 .
- [34] F. Medjdoub, "optimisation par la simulation système d'une chaîne de transmission numérique par fibre optique haut débit", mémoire de magister, université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen ,2010.
- [35]<http://www.abcelectronique.com/divers/dossiers/photodetecteurs>
- [36]SBenzeghda."Etude d'unphotodecteur PIN en Germanium et en alliage SiGe pour obtenir le diplôme de magister en électronique, université de Constantine.
- [37] L.VIROT, Développement de photodiodes à avalanche en Ge sur Si pour la détection faible signal et grande vitesse, 2014.
- [38]L.VIROT, Développement de photodiodes à avalanche en Ge sur Si pour la détection faible signal et grande vitesse 9 Décembre 2014.
- [39] R.Goering, "Mixed-signal simulation tool supports Linux". EE Times. Retrieved 2010.
- [40] G. Valco, "Getting Started with the Silvaco TCAD Software for EE637 and EE734". Archived from the original on 2008-08-28. Retrieved 2010-04-13.
- [41] F. Bourouba, Modélisation et simulation des contacts métal-semi-conducteur à barrière inhomogène, 10/ 2010.
- [42] TJR, Jr. SilvacoTCAD,2005.
- [43] Patrick henry,ATLAS User's Manual , October 2004 .
- [44] Maria Concetta Allia, Device simulation .

- [45] <http://ridh.cfd.rit.edu/products/manual/silvaco/atlasuser.pdf>
- [46] <https://www.aimetoulouse.fr/DOCPDF/CAO/TPCAO/TPSilvacoGuide.pdf>
- [47] https://www.silvaco.com/products/trac/device_simulation/atlas/atlasbrouchure33.pdf
- [48] DeckBuild, Interactive Deck Development and Runtime Environment.
- [49] <http://majhar.wordpress.com/silvaco-tutorial/>
- [50] <https://ikee.lib.auth.gr/record/300656/files/GRI-2018-22876.pdf>
- [51] <http://www.eng.buffalo.edu/~wie/silvaco/atlasusermanual>
- [52] R.J. McIntyre, "A new look at impact ionization-Part I: A theory of gain, noise, breakdown probability, and frequency response," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 46, pp. 1623-1631, 1999.
- [53] Y. Okuto and C.R. Crowell, "Threshold energy effect on avalanche breakdown voltage in semiconductor junctions," Solid-State Electronics, Vol. 18, pp. 161-168, 1975.
- [54] Atlas user's manual, SILVACO TCAD, 2008.
- [55] J. Bude and K. Hess, "Thresholds of impact ionization in semiconductors," J. Appl. Phys. 72(8), 3554–3561 (1992).
- [56] C. H. Tan, G. J. Rees, P. A. Houston, J. S. Ng, W. K. Ng, and J. P. R. David, "Temperature dependence of electron impact ionization in In_{0.53}Ga_{0.47}As," Appl. Phys. Lett. 84(13), 2322–2324 (2004).