

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons 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 programme de simulation qui permettant le calcul de caractéristiques courant-tension et la réponse spectrale des photodiodes à avalanche. Puis, nous réaliserons une description des différents étapes de simulation électrique telles que la discrétisation, la polarisation, etc.

## II.2 SILVACO

SILVACO est une entreprise qui se spécialise dans le développement de logiciels de simulation visant presque tous les aspects de la conception électronique moderne. Dans leur suite d'outils TCAD, l'entreprise fournit des capacités de modélisation et de simulation pour de simples circuits de type Spice tout le long du parcours de fabrication VLSI détaillée (figure II.1). Des environnements conviviaux et un grand nombre d'options de modélisation différentes sont utilisés pour faciliter la conception. Les phénomènes modélisés vont de la conductivité électrique simple à des trucs tels que l'analyse thermique, le rayonnement et les effets du laser. Une grande variété des processus détaillés de la croissance des couches et les propriétés des matériaux (les mobilités, les paramètres de recombinaison, les coefficients d'ionisation, les paramètres optiques) de plus la précision de la simulation. Cependant, il n'y pas à ce jour de documents disponibles des efforts déployés par les chercheurs ou les fabricants de photodiodes pour utiliser cet outil puissant pour la modélisation des photodiodes à avalanche [25].

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) [26]. Les composants de base de VWF sont [26].

- ➡ 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.

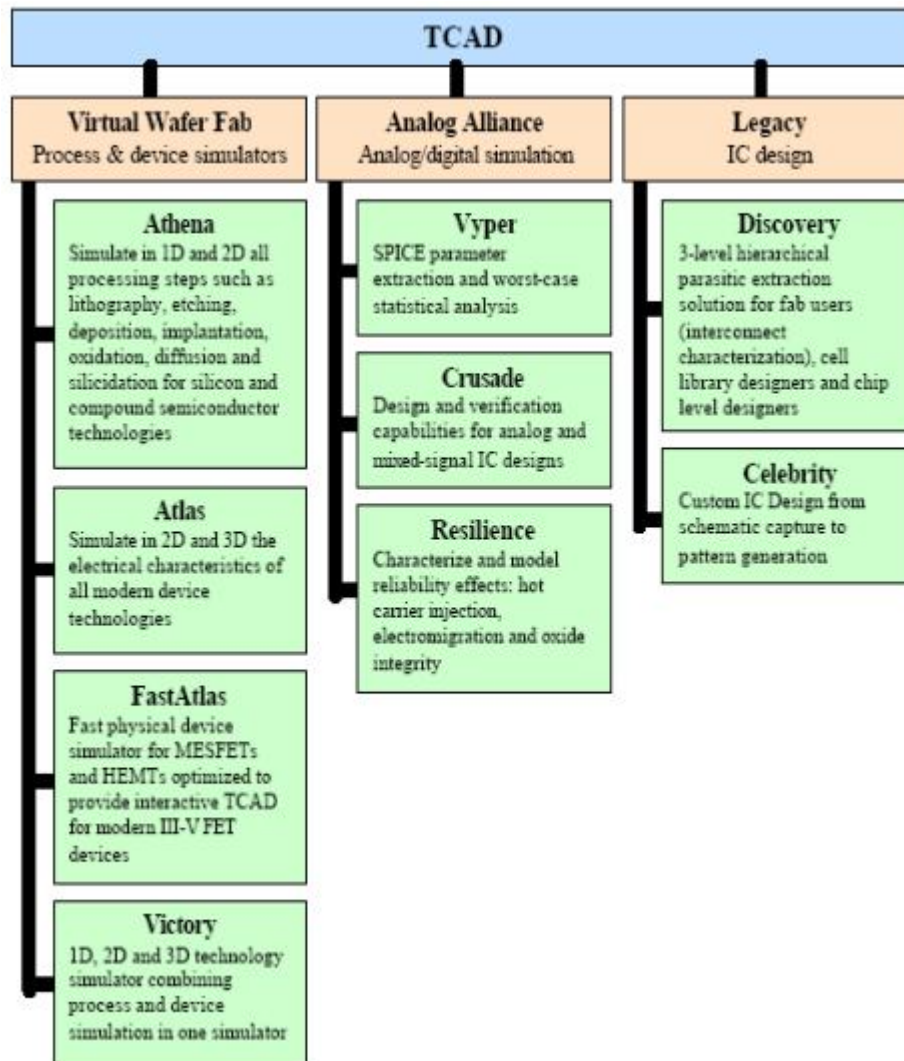


Figure. II.1 : La suite d'outils TCAD de SILVACO [27].

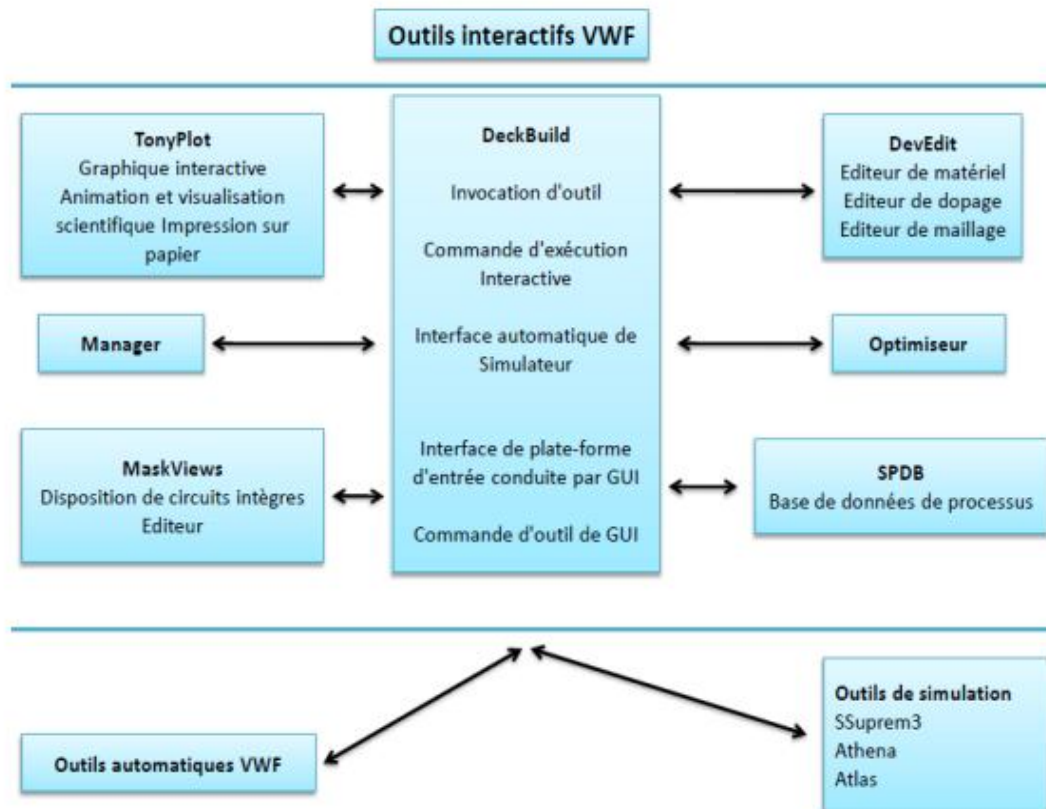


Figure .II.2 : Organigramme de la structure VWF [28].

Les modules de VWF sont les suivants [28]:

➤ Pour les outils interactifs VWF :

**TonyPlot** : outil de visualisation et d'analyse graphique 1D et 2D des résultats des simulations.

**Manager** : Outil de gestion des fichiers utilisés et créés par VWF.

**MaskViews** : Outil de dessin des masques (layouts).

**DeckBuild** : Environnement d'exécution interactif qui permet la simulation des processus et de dispositifs (mais principalement il est l'interface des outils de simulation).

**DevEdit** : Outil d'édition de structure, on peut créer de nouvelles structures ou même modifier des structures existantes, on peut définir des maillages ou raffiner les maillages existants.

**Optimiseur** : Outil d'optimisation automatique.

**SPDB** : (Process Data Base), c'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.

➡ Pour les outils de simulation :

**SSuprem3** : Simulateur de procédé 1D avec prolongements simples de simulations des dispositifs.

**Athéna** : Simulateur 2D de procédés technologiques qui permet de simuler les différentes étapes effectuées en salles blanches et ainsi d'obtenir la structure du dispositif (couches constitutives, dimensions, géométrie) avec les profils de dopage.

**Atlas** : Simulateur 2D ou 3D de dispositifs semi-conducteurs qui permet d'obtenir leurs caractéristiques électriques (statiques ou dynamiques).

Ce mémoire emploi Atlas pour la simulation numérique des photodiodes à avalanche.

## II.3 Bases physiques du principe de fonctionnement du simulateur TCAD-SILVACO

### II.3.1 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 l'équation de continuité. 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 [29].

L'équation de Poisson montre une relation entre le potentiel et la densité des porteurs :

$$\varepsilon \Delta V = -q(p - n + N_D^- - N_A^+) \quad (II.1)$$

Où  $\varepsilon$  est la constante diélectrique,  $V$  est le potentiel,  $\Delta V$  représente le Laplacien du potentiel,  $q$  est la charge élémentaire d'électrons,  $N_D^-$  et  $N_A^+$  sont les concentrations des dopants donneurs et accepteurs ionisées,  $n$  et  $p$  sont les densités des porteurs.

L'évolution temporelle des densités de porteurs obéit aux équations de continuité pour les électrons et les trous :

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - U_n + \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_n \quad (II.2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - U_p + \frac{1}{q} \text{div} \vec{J}_p \quad (II.3)$$

Où  $G$  et  $U$  sont respectivement les taux de génération et de recombinaison des porteurs,  $j_n$  et  $j_p$  sont les densités de courant des électrons et des trous respectivement.

Les dérivations basées sur la théorie de transport de Boltzmann ont prouvé que la densité des courants dans les équations de continuité peut être définie par le modèle d'entraînement-diffusion. Les densités de courants sont exprimées en deux termes. Le premier

correspond à l'entraînement des charges par le champ électrique, le second correspond à la diffusion des porteurs.

$$\vec{J}_n = qnU_n\vec{E} + qD_n\overrightarrow{gradn} \quad (II.4)$$

$$\vec{J}_p = qpU_p\vec{E} + qD_p\overrightarrow{gradp} \quad (II.5)$$

$$\vec{E} = -\overrightarrow{gradV} \quad (II.6)$$

Où  $D_n$  et  $D_p$  sont les coefficients de diffusion. Ils sont directement reliés aux mobilités des porteurs par la relation d'Einstein :

$$D_n = \frac{KT}{q} U_n \quad (II.7)$$

$$D_p = \frac{KT}{q} U_p \quad (II.8)$$

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.

La modélisation physique est réalisée en tenant compte de la probabilité d'occupation des niveaux d'énergie, de la mobilité des porteurs et des différents types de recombinaison générations. Plusieurs modèles ont été développés pour les semi-conducteurs en fonction du choix de la technologie (bipolaire, CMOS), de la concentration des dopants, des dimensions et de la température de fonctionnement. Ces grandeurs doivent être choisies d'une manière judicieuse pour se rapprocher du comportement physique réel du dispositif. Les modèles physiques de TCAD utilisés dans cette étude sont les modèles de Selberherr et Toyabe, de Lombardi, de Fermi-Dirac et de SRH (Shockley Read Hall).

### II.3.2 Modèles physiques utilisés

Pour l'ensemble des simulations TCAD effectués dans cette étude, le logiciel fait appel à différents modèles physiques (cité sous-dessous), qui sont être utilisés à chaque simulation considérée.

#### ➡ Le modèle de Fermi

Ce modèle est utilisé par TCAD lors de l'étape de la diffusion des dopants (redistribution). L'avantage principal de ce modèle est sa vitesse de simulation [30].

#### ➡ Le modèle de Lombardi (mobilité)

La mobilité des porteurs (électrons et trous) dépend du champ électrique parallèle qui accélère les électrons et les trous, la température du réseau et la concentration des dopants.

La dégradation de la mobilité se produit à l'intérieur des couches d'inversion. Cet effet est simulé dans ATLAS à l'aide de trois modèles distinctes :

- ✓ Modèle de dégradation de la mobilité qui dépend de la concentration *conmob*.

- ✓ Modèle de dégradation de la mobilité qui dépend du champ électrique latéral *fldmob*.
- ✓ Modèle spécifique de la mobilité de la couche d'inversion *CVT*.

Le modèle *CVT* est conçu en tant que modèle autonome qui incorpore tous les effets requis pour simuler la mobilité des porteurs. La modélisation de la mobilité la plus complète est basée sur le modèle de Lombardi. C'est un modèle de mobilité qui prend en compte la variation de la mobilité avec le champ électrique, la concentration de dopants et la température. Ce phénomène est introduit par le simulateur en ajoutant *CVT* dans la commande *MODELS* [31].

#### ✚ Le modèle Sockley-Read-Hall (recombinaison-génération)

Lorsque le semi-conducteur subit une perturbation par exemple l'impact d'un ion, cette excitation introduit une génération de paires électrons/trous. Ensuite, le système revient à l'état d'équilibre par le processus de recombinaison. La simulation par *ATLAS* prend en compte les recombinaisons *SRH* sur des niveaux profonds. Le taux de recombinaison est donné par l'expression suivante :

$$U_{SRH} = \frac{n.p - n_i^2}{\tau_p \left[ n + n_i \exp\left[\frac{E_{trap}}{kT_L}\right] \right] + \tau_n \left[ p + n_i \exp\left[-\frac{E_{trap}}{kT_L}\right] \right]} \quad (II.9)$$

Où  $E_{trap}$  est la différence entre le niveau d'énergie du piège et le niveau de Fermi intrinsèque,  $T_L$  est la température du réseau en degrés Kelvin, et  $\tau_n$ ,  $\tau_p$  les durées de vie respectives des trous et des électrons. Le modèle de résolution numérique de ce phénomène est activé dans le programme de simulation en ajoutant le mot clé *SRH* à la commande *MODELS* [31].

Paramètres	Valeur par défaut
$E_{trap}$	0eV
$\tau_n$	$10^{-7}$ s
$\tau_p$	$10^{-7}$ s

Tableau. II.1 : Valeurs des paramètres utilisés dans l'équation (II.1).

## II. 4 ATLAS

Le logiciel de simulation *ATLAS* est un simulateur de modélisation bidimensionnelle de composants capable de prédire les caractéristiques électriques de la plupart des composants semi-conducteurs en régime continu , transitoire ou fréquentiel.

En plus du comportement électrique «externe», il fournit des informations sur la distribution interne de variables telles que les lignes de courant, le champ électrique et le potentiel. Ce ci est réalisé en résolvant numériquement l'équation de poisson et les équations de continuité des électrons et des trous (à deux dimensions) en un nombre fini de points formant le maillage de la structure défini par l'utilisateur ou par le programme.

Ce simulateur est composé de deux parties :

- Une partie de traitement numérique (méthode d'intégration, de discrétisation),
- Une partie formée des modèles physiques des composant semi-conducteurs : 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 [32].

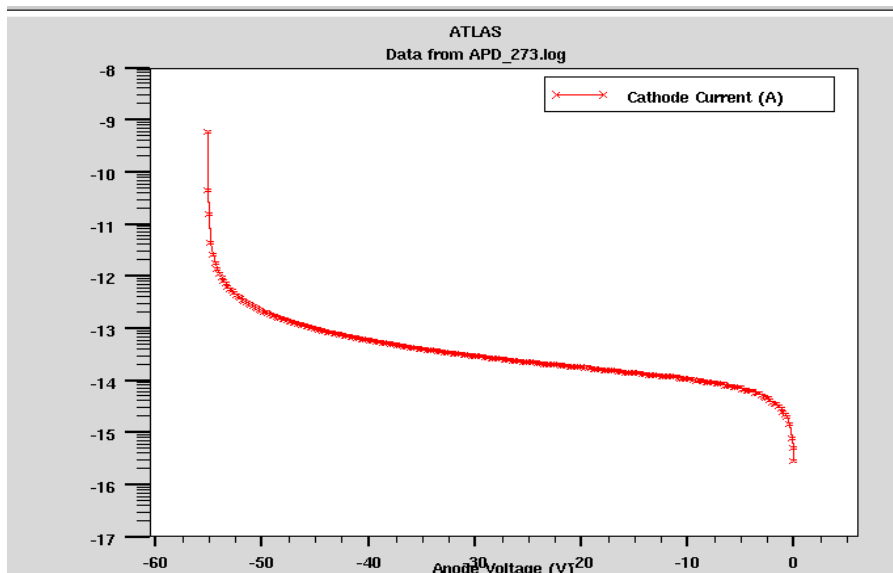


Figure. II.3 : Exemple de simulation par ATLAS : caractéristique de courant –tension dans une photodiode à avalanche.

## II .5 L'interface d'ATLAS

Avec ATLAS l'interface est fournie par l'environnement exécutable "Deckbuild" de SILVACO via un fichier texte ASCII. La structure et les entrées de commandes ATLAS sont nécessaires pour simuler un dispositif. Les données de la structure contiennent les dimensions, les caractéristiques des matériaux, et les paramètres du maillage du dispositif étudié. Le fichier de commandes qui identifie les commandes ATLAS va être exécuté pour obtenir les outputs désirés. L'ordre dans lequel les déclarations sont spécifiées à ATLAS est important et doit être conforme aux étapes suivantes: caractéristiques structurales, spécifications des modèles de matériaux, sélection de la méthode numérique, spécification des solutions, puis



l'analyse des résultats. De plus, l'ordre dans chacune de ces spécifications est également important. Par exemple, lors de l'identification des spécifications de la structure, l'ordre de commande nécessaire est : le maillage, les régions, les électrodes, puis le dopage. Le non respect de cet ordre spécifié se traduit par des déclarations ignorées, des résultats de simulation erronés et / ou la cessation du programme.

La (figure. II.4) montre un schéma en block de l'interface d'ATLAS. Deux fichiers d'entrée, un qui définit la structure et l'autre les commandes. Ensuite les trois fichiers de sortie. Le premier affiche la durée de l'exécution, l'avancement, l'erreur et des fois des messages d'avertissement. Le deuxième fichier stocke les tensions et les courants terminaux du dispositif. Le troisième fichier stocke toutes les valeurs des variables liées aux solutions du dispositif [33] .

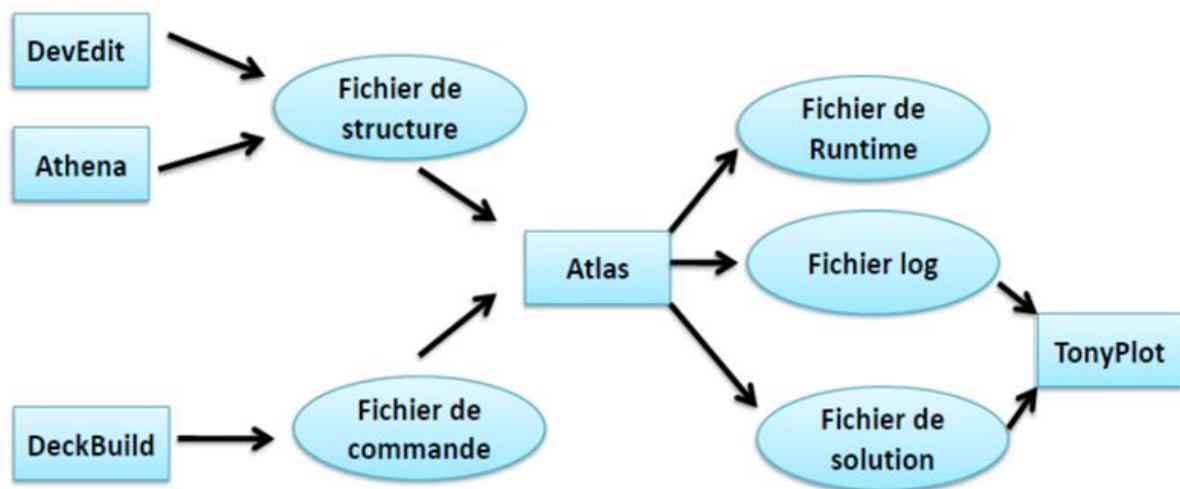


Figure. II.4 : Entrées et sorties d'Atlas.

### II.5.1 Deckbuild

Deckbuild est un outil d'environnement d'exécution puissant qui permet à l'utilisateur de manière transparente d'aller de la simulation de processus à la simulation de dispositifs à l'extraction de modèles SPICE. Il est facile d'utiliser l'environnement de l'exécution pour exécuter des simulateurs de base tels qu'ATLAS. Deckbuild contribue à créer des fichiers d'entrée à ATLAS. Plusieurs fenêtres fournissent des ponts d'entrées à base de menus ou à base de textes pour les informations saisies. Il comprend également un grand nombre d'exemples pour tous les types de technologies. Autres outils de simulation, tels que TONYPLOT, DEVEDIT et MASKVIEW peuvent également être invoqué à partir de Deckbuild. Les optimiseurs de Deckbuild contribuent à l'optimisation des cibles comme les dimensions



structurelles et les paramètres des dispositifs après des tests électriques compliqués et des outputs intermédiaires[34].



Figure. II.5: L'interface de DeckBuild

## II.5.2 Tonyplot

TONYPLOT est L'environnement où sont visualisés les résultats des simulations. Il donne des possibilités complètes pour la visualisation et l'analyse des caractéristiques de sortie (structure du composant électronique, profil de dopage, et caractéristiques électriques). Selon le programme de simulation, TONYPLOT peut donner des caractéristiques de sortie en une dimension (1D), deux dimensions (2D), ou trois dimensions (3D). Dans ce mémoire, nous présenterons les résultats de la simulation en deux dimensions 2D [35].



Figure. II.6 : Fenêtre de Tony Plot.

## II.6 Travailler avec ATLAS

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 [34].

Le fichier d'entrée d'ATLAS contient un ordre de lignes de commande. Chaque ligne consiste en un nombre de déclaration qui identifie la commande et un jeu de paramètres. Le format général est : <DÉCLARATION> <PARAMÈTRE> = <VALEUR>.

Par exemple : DOPING UNIFORM N.TYPE CONCENTRATION=1e16 REGION=1

La déclaration est DOPING les paramètres sont UNIFORM N.TYPE CONCENTRATION, et les valeurs sont 1e16 pour la concentration et 1 pour indiquer la région. Les groupes de commande sont résumés dans le (tableau .II.2) [34].

Groupe	Déclarations
Spécification de la Structure	MAILLE
	RÉGION
	ÉLECTRODE
	DOPAGE
Spécification des modèles des matériaux	MATÉRIELLE
	MODÈLES
	CONTACT
	INTERFACE
Numerical Method Selection	MÉTHODE
Spécification des solutions	LOG
	SOLVE
	LOAD
	SAVE
Analyse des Résultats	EXTRACT
	TONYPLOT

Tableau. II.2 : Groupes de commande d'atlas et déclarations primaires [34].

### II.6.1 Spécification de la structure

La spécification de la structure est obtenue en identifiant le maillage, la région, les électrodes et les niveaux de dopage [34].

#### ✚ Maillage:

Une étape très importante et indispensable qui doit être effectuée avant d'entamer la simulation du procédé technologique est le maillage du dispositif. Le maillage joue un rôle important pour l'obtention des données de simulations. Il doit être fait avec la plus grande attention pour garantir la fiabilité des résultats [36]. Parmi les méthodes numériques utilisées pour résoudre les équations physiques est la méthode des éléments finis. Son principe de base est la discrétisation par éléments des équations à traiter. Les éléments qui définissent la maille élémentaire utilisée par le simulateur sont des prismes. Pour obtenir des résultats fiables et précis, la finesse du maillage doit être définie en fonction des variations des grandeurs physiques. Le choix de maillage doit être fait de façon à avoir un compromis entre la vitesse d'exécution et l'exactitude des résultats [37]. La figure suivante montre le maillage sur une partie d'une structure simulé de photodiode à avalanche, sous SILVACO.

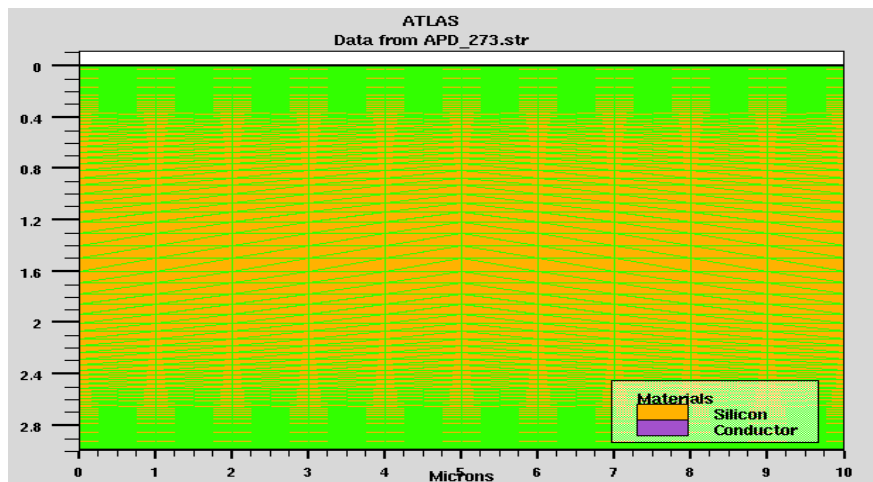


Figure. II.7 : maillage d'une photodiode d'avalanche.

Le format général pour définir la maille est :

Y.MESH LOCATION=<VALUE> SPACING=<VALUE> (Position des Y avec la spécification de l'espacement).

X.MESH LOCATION=<VALUE> SPACING=<VALUE> (Position des X avec la spécification de l'espacement).

Un maillage grossier ou fin détermine l'exactitude de la simulation. Un maillage grossier donne une simulation plus rapide, mais des résultats moins précis. Un maillage fin donne une simulation plus lente, mais des résultats plus précis [38].

### ➔ Électrodes :

Les électrodes sont définies de manière qu'ils soient en contact avec les régions semi-conductrices pour cela la commande nécessaire est « ELECTRODE », sous l'environnement SILVACO il est possible d'introduire jusqu'à 50 électrodes sur le même programme. Généralement la forme de l'électrode est aussi rectangulaire et limité par les paramètres x.min, x.max, y.min, y.max [35].

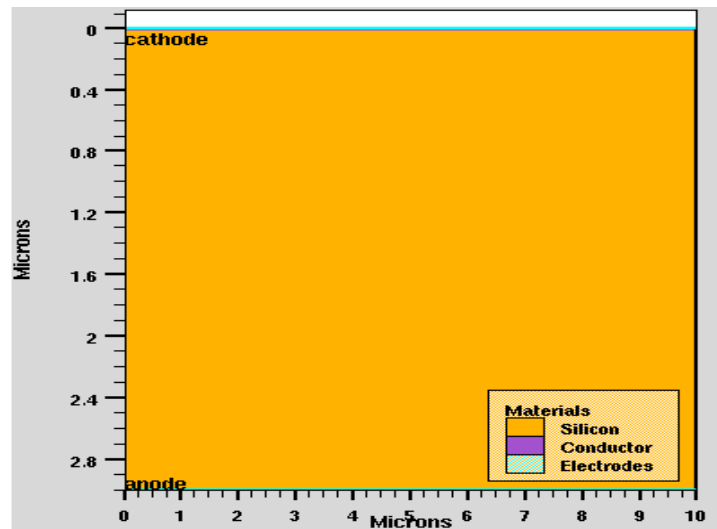


Figure. II.8 : Electrode d'une photodiode à avalanche.

### ➔ Dopage :

Dans cette étape on doit préciser le dopage dans les régions semi conductrices on utilise pour cela la commande « doping » le profil du dopage peut être uniforme sur toute la région considérée comme il peut être Gaussien.[35]. Le format de la déclaration d'Atlas est comme suit :

Dopage gaussien conc=1e20 n. type direction=y

Dopage gaussien conc=1e20 p. type direction=y

Dans la (figure. II.9), on présente un exemple de dopage. On définit les types de dopage et les niveaux de dopage (concentration). Le dopage peut être de type n ou de type p. Le profil du dopage peut être uniforme comme il peut avoir une distribution (par exemple Gaussienne). Dans l'exemple de la figure, le dopage est Gaussien avec une concentration de  $10^{20}\text{cm}^{-3}$  de type p et une concentration Gaussienne  $10^{20}\text{cm}^{-3}$  de type n.

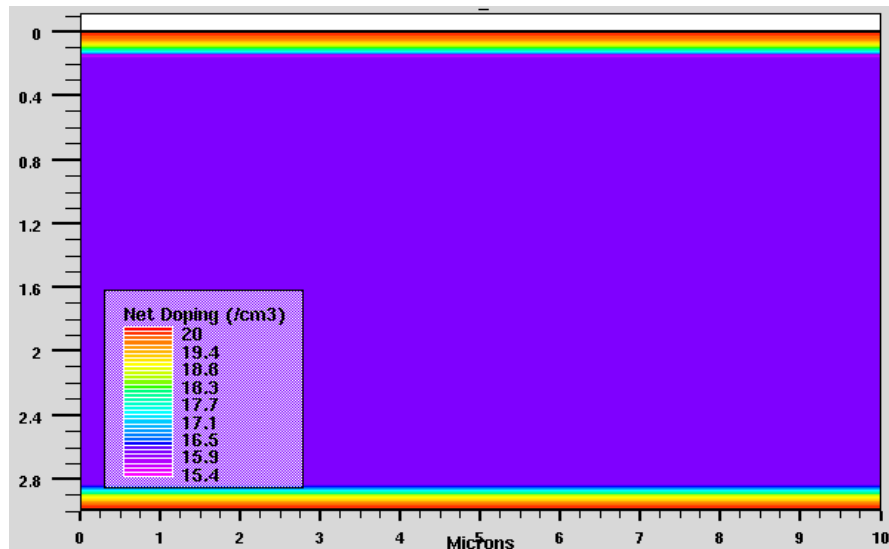


Figure. II.9 : Dopage d'une photodiode d'avalanche.

### II.6.2 Spécification des paramètres (matériaux, interfaces, contacts, et modèles physiques)

#### ✚ Matériaux :

Dans un programme SILVACO il est obligatoire de spécifier le matériau utilisé pour chaque région de la structure. Cette étape doit être faite au même temps que l'étape de définition des régions ceci est faisable en utilisant la commande « matériel= (Si, Ge, SiO<sub>2</sub>, Polysilicium) » ajoutée à la fin de l'instruction de définition de la région. [35]

#### ✚ Modèles :

Il existe plusieurs catégories de modèles physiques concernant : la mobilité, la recombinaison, les statistiques de transporteur, l'impact d'ionisation (pour les champs forts) l'effet tunnel, modèles dépendants de la température (en cas de variation de température), les collisions locales et leurs effets sur la durée de vie et la température locale. Même pour le modèle de transport il y en a plusieurs : Drift diffusion, Equilibre d'énergie, Quantique (revoir définition d'ATLAS) [34].

Le choix des modèles dépend des matériaux choisis pour la simulation et leurs environnement et dimensions. L'exemple ci-dessous présente quelques modèles :

MODELS CONMOB FLDMOB SRH

CONMOB Signifie que la mobilité est dépendante de la concentration des dopants. FLDMOB signifie que la mobilité est dépendante du champ électrique. SRH c'est les statistiques de Shockley-read-Hall [39].

### ✚ **Contacts :**

La commande CONTACT spécifie le travail de sortie du métal utilisé comme contact pour les électrodes de la structure. Pour des processus de fabrication plus facile le métal est remplacé actuellement par un poly silicium [35].

### ✚ **Interface :**

La déclaration d'INTERFACE est employée pour spécifier la densité de charge de l'interface et la vitesse de recombinaison superficielle aux interfaces entre les semi-conducteurs et les isolants [40].

## **II.6.3 Sélection de la méthode numérique**

Après la spécification des modèles des matériaux, le choix de méthode numérique doit être effectué. La seule déclaration qui s'applique à la sélection de la méthode numérique est la déclaration de méthode. Une variété de méthodes numériques existe pour calculer les solutions [34] :

- ✓ La Méthode de GUMMEL
- ✓ La Méthode de NEWTON
- ✓ La Méthode BLOCK

## **II.6.4 Sélection des paramètres à extraire**

La sélection des paramètres à extraire est faite par les déclarations LOG, SOLVE, LOAD, et SAVE

### ✚ **Log.**

LOG enregistre toutes les caractéristiques finales dans un fichier. Des données DC, transitoire, ou AC sont générées par la déclaration SOLVE après l'enregistrement d'une déclaration LOG. L'exemple suivant montre un exemple de la déclaration LOG.

LOG OUTFILE=<filename>

Dans cet exemple, la déclaration de log sauvegarde les données courant-tension dans un fichier dont le nom est <.....>.log [34].

### ✚ **Solve:**

La déclaration SOLVE suit la déclaration LOG. SOLVE effectue une solution pour un ou plusieurs points de polarisation. Cette déclaration a le format de base suivant :

SOLVE <bias\_points> [34].

**➤ Load et Save :**

La commande LOAD introduit les solutions précédentes à partir de fichiers comme valeurs initiale à d'autres points de polarisation. L'instruction SAVE introduit toutes les informations attribuées à un point nœud dans un fichier output (fichier de sortie) [41]. Les instructions pour Load et Save sont comme suit [41] :

LOAD INFILE=<filename>

SAVE OUTFILE =<filename>

**II.6.5. Analyse des Résultats**

Une fois que la solution est trouvée pour un problème du dispositif semi-conducteur, les informations peuvent être affichées graphiquement par TonyPlot. En outre, les paramètres du dispositif peuvent être extraits par la déclaration EXTRACT [34].

**II.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement de logiciel TACD-SILVACO, et ces modules de simulation ATLAS, l'environnement où est défini le programme de simulation (DECKBUILD), et l'outil de visualisation (TONYPLOT). Cet puissant outil permet de développer des programmes de simulation des caractéristique I-V des photodiodes à avalanche qui seront étudiées. Les résultats de simulation seront présentés dans les chapitres suivant.