

IV.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous nous sommes constamment appuyés sur les modèles physiques, définits dans le troisième chapitre tel que les modèles de transport et les modèles d'ionisation par impact, pour étudier l'effet de la température et la concentration du dopage de la zone de multiplication sur le comportement électrique de la photodiode à avalanche en régime statique.

En suite, nous utiliserons le logiciel de simulation SILVACO pour réaliser des simulations numériques 2D permettant par la suite d'obtenir des résultats issus des différentes structures des photodiodes étudiées.

IV.2.Influence des paramètres (dopage et température)

IV.2.1.Influence de la température

Dans cette section, nous sommes intéressés d'étudier l'impact de la température sur les performances électriques de la photodiode à avalanche. L'implémentation de deux modèles d'ionisation de Selberherr et de Toyabe en introduisant l'effet de la température a été effectuée pour calculer la tension de claquage V_B .

IV.2.1.1.Champ électrique

La (figure IV.1) représente la distribution du champ électrique dans la zone de multiplication de la photodiode étudiée pour différente valeur de température (°K). Cette dernière a été polarisée en inverse par des tensions près de la tension de claquage.

On remarque que l'augmentation de la température provoque une augmentation du pic du champ électrique dans la jonction N+/P qui empêche les porteurs majoritaires de se déplacer entre les deux jonctions.

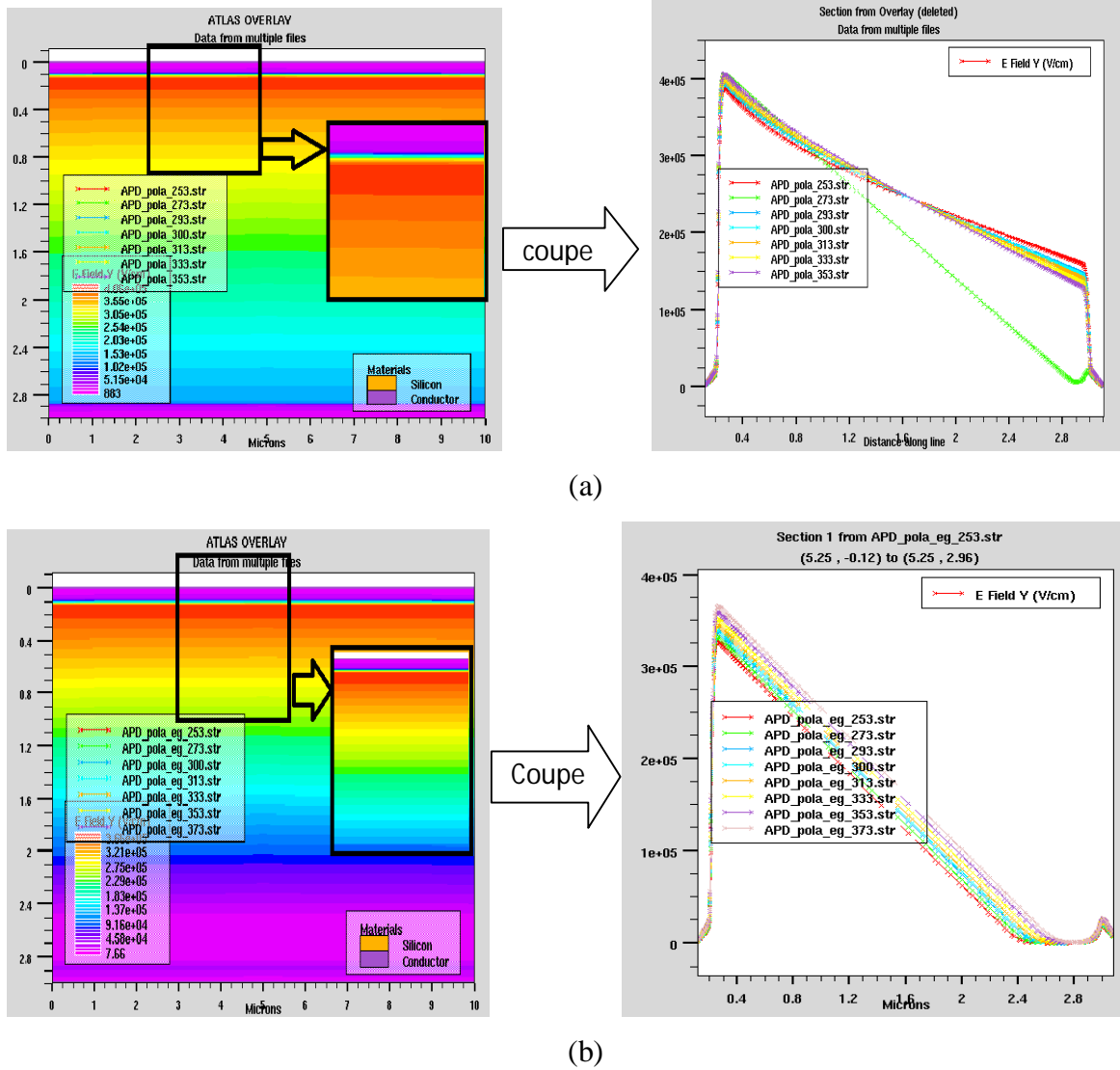
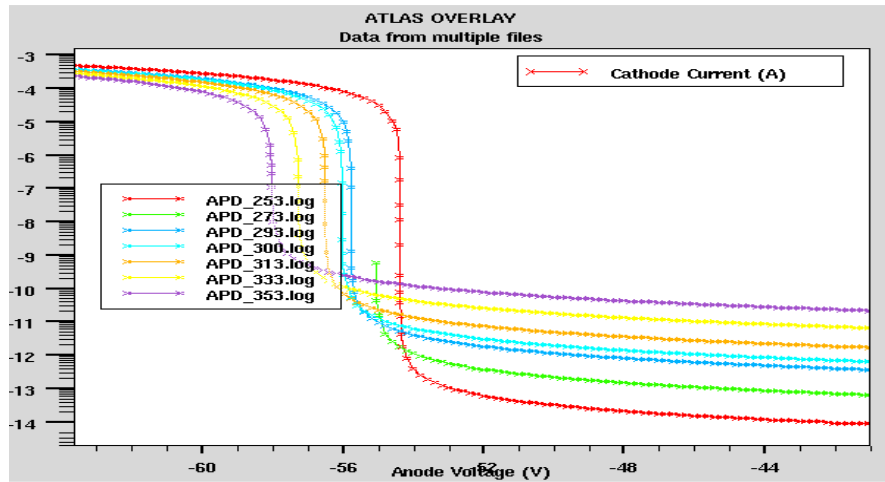


Figure .IV.1 : Distribution du champ électrique dans la zone de multiplication pour différente valeur de température 253°K,273°K,293°K, 300°K,313°K,333°K et 353°K (a) modèle de *Drift-diffusion* avec le modèle de *Selberherr* (b) modèle de *Energy-Balance* avec le modèle de *Toyabe*

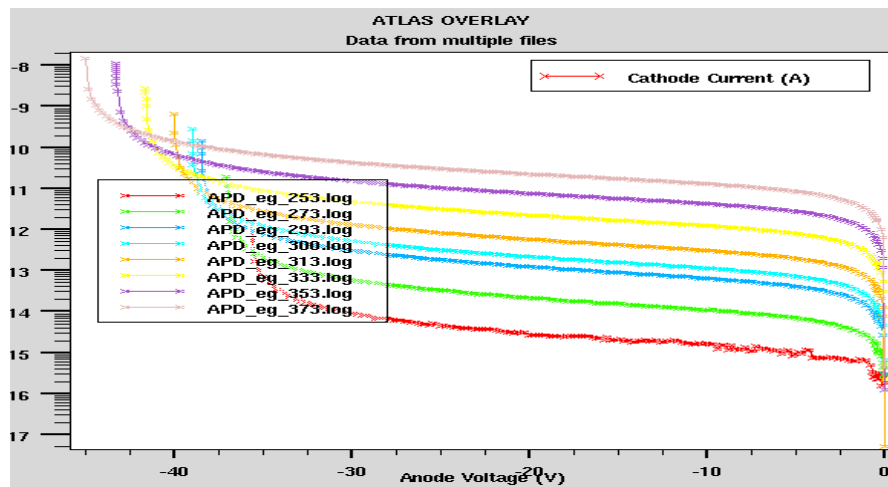
Par comparaison des deux modèles utilisés dans cette étude, le modèle de transport *Drift-diffusion* avec le modèle d'ionisation par impact *Selberherr* et le modèle de transport *Energy-Balance* avec le modèle d'ionisation par impact *Toyabe*, nous remarquons que le premier modèle a une valeur maximale du champ électrique de l'ordre de $4 \cdot 10^5$ V/cm avec la formation d'une zone désertée (la zone de charge d'espace) de l'ordre de $2.8 \mu\text{m}$. par contre, le deuxième modèle a une valeur maximale du champ électrique de l'ordre de $3.5 \cdot 10^5$ V/cm avec la formation d'une zone désertée (la zone de charge d'espace) de l'ordre de $2.4 \mu\text{m}$.

IV.2.1.2. Caractéristique courant-tension I-V

En polarisation inverse le courant d'obscurité est appelé courant de fuite, c'est le courant qui passe à travers le volume la photodiode. Le phénomène responsable de ceci est principalement la recombinaison.



(a)



(b)

Figure IV.2 : l'effet de la température sur la caractéristique courant-tension (a) modèle de *Drift-diffusion* avec le modèle de *Selberherr* (b) modèle de *Energy-Balance* avec le modèle de *Toyabe*

La (figure IV.2) représente l'effet de la température sur la caractéristique courant-tension de la photodiode à avalanche où la zone de multiplication est dopée en Bohr (type P) avec une concentration de $N_B=10^{16}\text{cm}^{-3}$.

Cette figure montre d'une part, qu'une augmentation de la tension de polarisation en inverse provoque une augmentation de courant d'obscurité qui atteint des valeurs maximale

près de la tension de claquage. D'autre part, l'augmentation de la température tend à une augmentation dans le courant d'obscurité de 10^{-14} A à 10^{-10} A pour le premier modèle et de 10^{-15} A à 10^{-11} A pour le deuxième modèle pour un intervalle de température de 253°K à 333°K.

IV.2.1.3.l'effet de la température sur la tension de claquage

Dans cette section, Nous allons maintenant étudier la sensibilité de la tension de claquage à la variation de la température dans l'intervalle 253°K à 333°K pour une photodiode à avalanche de 3μm dont la zone de multiplication est dopée avec une concentration de 10^{16} cm⁻³.

Le tableau suivant résume les résultats de simulation pour les deux modèles étudiés. Ces résultats sont plotés dans la (figure IV.3).

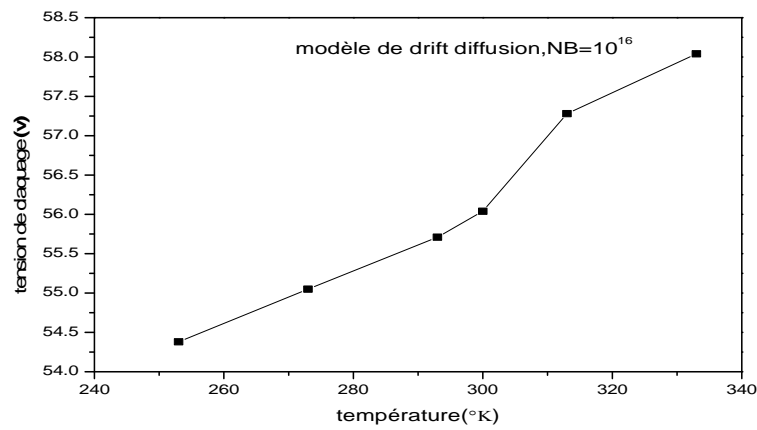
T (°K)	253	273	293	300	313	333
Vb(V) 1 ^{er} modèle)	54,38	55,05	55,71	56,04	57,28	58,04
Vb(V) 2 ^{ème} modèle)	35,62	37,00	38,45	38,96	39,87	41,54

Tableau IV.1 : Sensibilité de la tension de claquage à la température

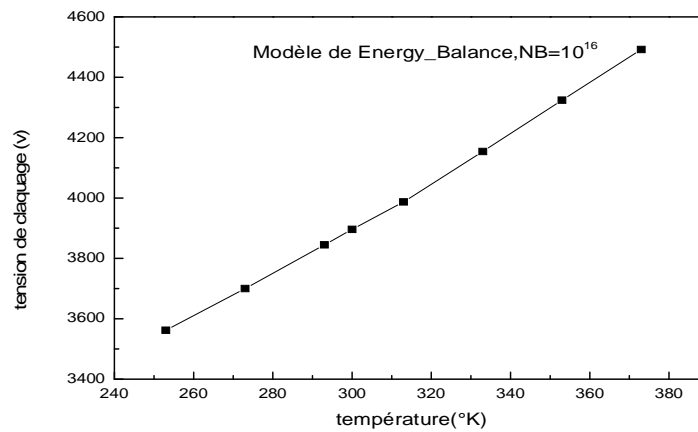
La (figure IV.3) montre la dépendance de la tension de claquage avec la température pour une concentration de dopage de $NB=10^{16}$ cm⁻³. Ces résultats sont obtenus pour les deux modèles étudiés : le modèle de *Drift-diffusion* combiné avec le modèle d'ionisation de *Selberherr* et le modèle de l'*Energy-Balance* combiné avec le modèle d'ionisation de *Toyabe*.

Cette figure montre qu'une augmentation de la température provoque une augmentation de la tension de claquage pour une concentration de dopage donné $NB=10^{16}$ cm⁻³. Le comportement obtenu est dû à une augmentation de la population des phonons avec la température.

Également, la dépendance de la tension de claquage avec la température est linéaire pour les deux modèles étudiés, où la variation de tension de claquage est fortement réduite en fonction de la température (moins sensible) 0.045 V/°K pour le 1^{er} modèle et plus sensible par rapport à la variation de la température ambiante pour le 2^{ème} modèle 0.075 V/°K.



(a)



(b)

Figure .IV.3 : Tension de claquage en fonction de la température dans l'intervalle 253°K à 333°K pour un dopage de $NB=10^{16} \text{ cm}^{-3}$ (a) modèle de *Drift-diffusion* avec le modèle de *Selberherr* (b) modèle de *Energy-Balance* avec le modèle de *Toyabe*

IV.2.2. Influence du dopage

Dans cette section, la tension de claquage sont calculés en utilisant les deux modèles d'ionisation par impact de Selberherr et Toyabe afin d'évaluer les performances d'APD à différents dopages de la zone de multiplication. On fixe la temperature à 300°K.

IV.2.2.1. Distribution du Champ électrique

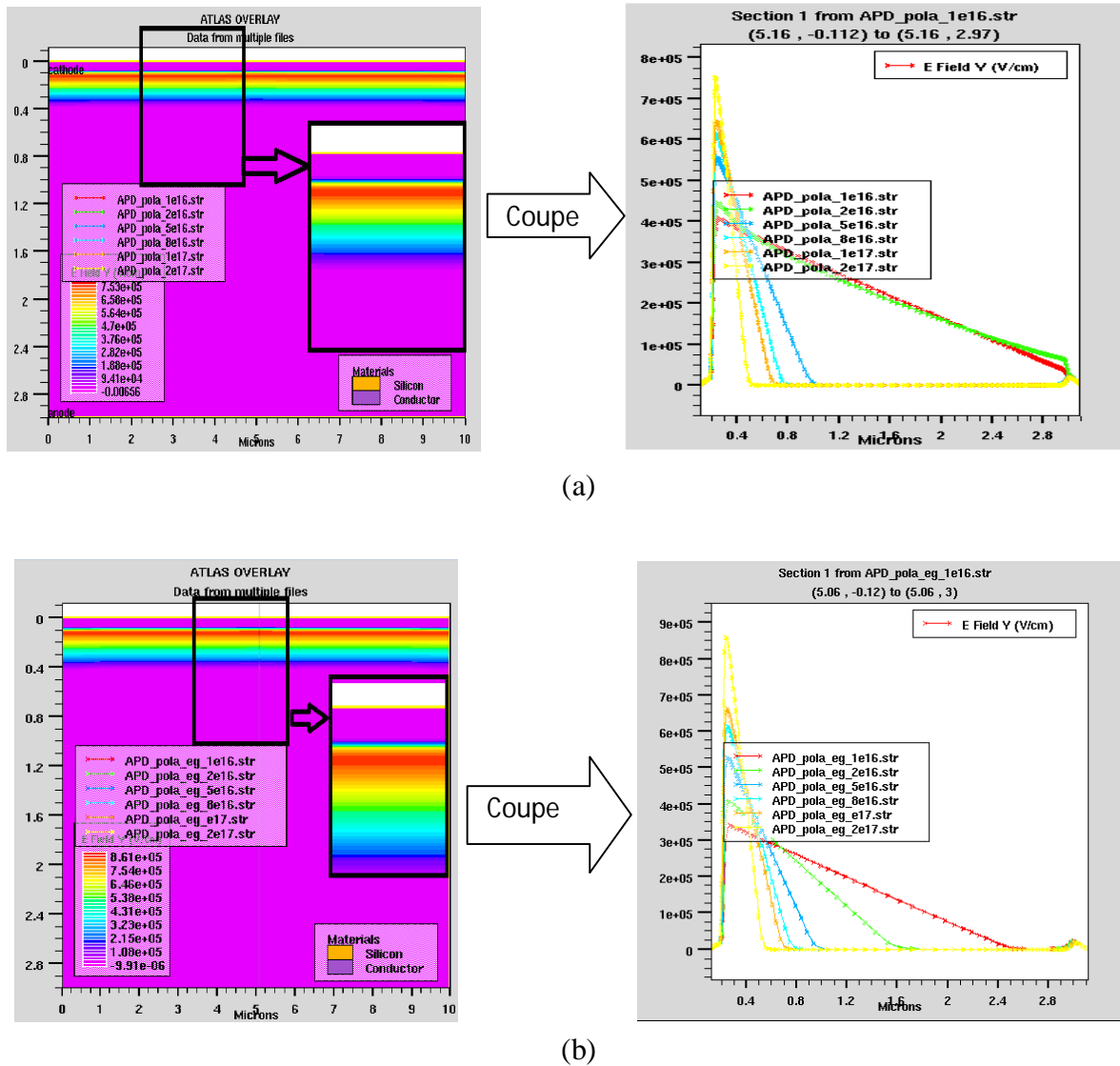


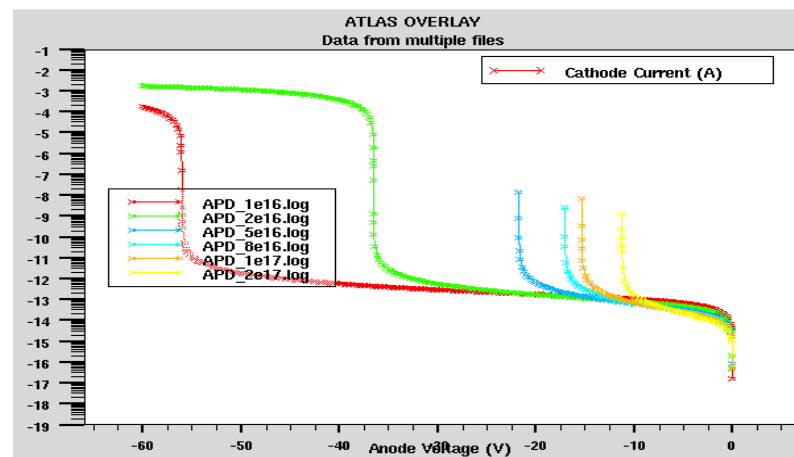
Figure .IV.4 : Distribution du champ électrique dans la zone de multiplication pour différentes valeur de dopage 10^{16} cm^{-3} , $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 10^{17} cm^{-3} et $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. (a) modèle de *Drift-diffusion* avec le modèle de *Selberherr* (b) modèle de *Energy-Balance* avec le modèle de *Toyabe*

La (figure IV.5) représente la distribution du champ électrique dans la zone de multiplication de la photodiode étudiée pour différentes structures dont la concentration du dopage de la zone de multiplication varie de 10^{16} cm^{-3} à $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Cette dernière a été polarisée en inverse par des tensions près de la tension de claquage. Les résultats de la simulation sont obtenus pour les deux modèles : modèle de *Drift-diffusion* avec le modèle de *Selberherr* (b) modèle de *Energy-Balance* avec le modèle de *Toyabe*.

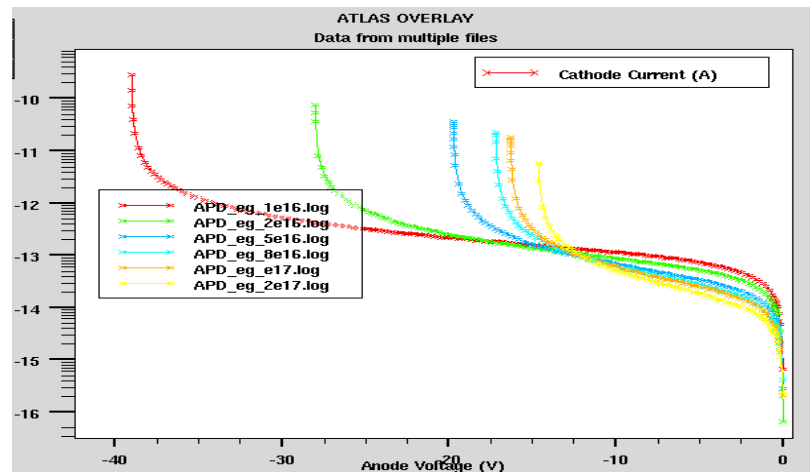
On remarque que si on augmente de la concentration du dopage de la zone de multiplication, le pic du champ électrique dans la jonction N+/P va s'augmenter et la longueur de la zone de déplétion va se diminuer. Donc, on peut dire qu'un faible dopage de la zone de multiplication offre l'avantage de présenter une zone de déplétion beaucoup plus large.

Autrement dit, un dopage élevé qui résulte une haute résistivité, permet d'appliquer au détecteur à photodiode un champ électrique élevé, favorable à la collection rapide des porteurs.

IV.2.2.2.Caractéristique électrique I(V)



(a)



(b)

Figure .IV.5 : Effet de la concentration du dopage sur la caractéristique courant-tension (a) modèle de *Drift-diffusion* avec le modèle de *Selberherr* (b) modèle de *Energy-Balance* avec le modèle de *Toyabe*

La caractéristique courant-tension obtenu avec les deux modèles combinés sont simulé, avec SILVACO, pour différentes concentration de dopage comprises entre $NB = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ à 10^{17} cm^{-3} . Les résultats de simulation sont illustrés sur la (figure IV.5). Comme on s'y attendait, cette figure montre que, tant que la tension de polarisation en inverse augmente, le courant d'obscurité va s'augmenter et atteint des valeurs maximales près de la tension de claquage. Cependant, le courant d'obscurité sera légèrement diminué en augmentant la concentration du dopage de la région de multiplication.

Là encore, l'évolution des caractéristiques courant-tension dans la (figure IV.5) montre l'effet de la concentration du dopage sur la tension du claquage. Cette dernière correspond à chaque structure en utilisant successivement les différentes valeurs des concentration du dopage 10^{16} cm^{-3} , $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 10^{17} cm^{-3} et $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Nous avons trouvé que la tension de claquage diminue lorsqu'on augmente la concentration du dopage de la zone de multiplication.

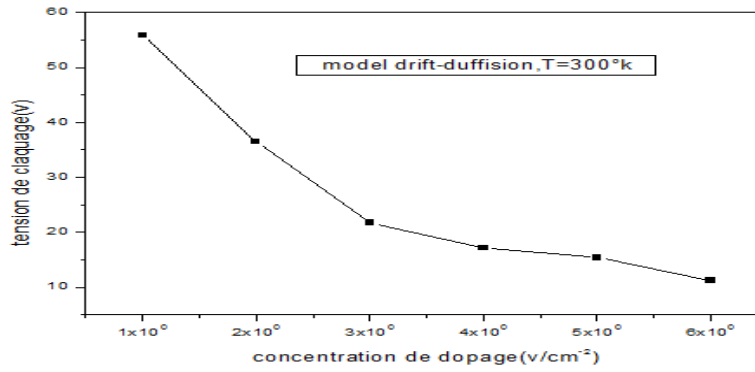
IV.2.2.3. l'effet du dopage sur la tension de claquage

Dans cette section, Nous allons maintenant étudier la sensibilité de la tension de claquage à la variation de la concentration du dopage de zone de multiplication dans l'intervalle de 10^{16} cm^{-3} à $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ pour une photodiode à avalanche de $3 \mu\text{m}$ dont la température est fixée à 300°K .

Le tableau suivant résume les résultats de simulation pour les deux modèles étudiés. Ces résultats sont plotés dans la (figure IV.7).

NB (cm^{-3})	10^{16}	2×10^{16}	5×10^{16}	8×10^{16}	10^{17}	2×10^{17}
$V_B(\text{V})$ 1 ^{er} modèle)	55,84	36,46	21,75	17,11	15,36	11,25
$V_B(\text{V})$ 2 ^{ème} modèle)	56,81	27,81	19,66	17,15	16,67	16,28

Tableau IV.2 : Sensibilité de la tension de claquage à la concentration du dopage de la zone de multiplication



(a)

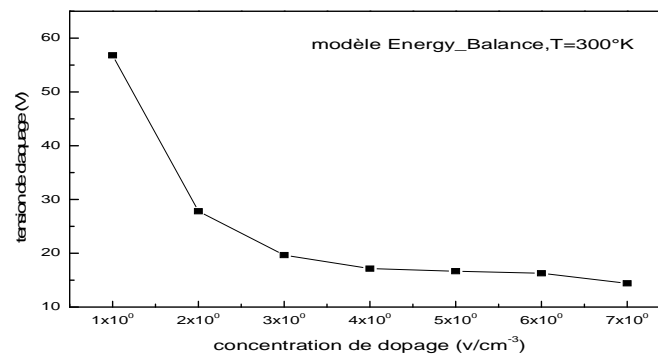


Figure .IV.6 : Tension de claquage en fonction de la concentration de dopage pour une température de 300°K. (a) modèle de *Drift-diffusion* avec le modèle de *Selberherr* (b) modèle de *Energy-Balance* avec le modèle de *Toyabe*

La (figure IV.6) montre la dépendance de la tension de claquage avec la concentration de dopage. Ces résultats sont obtenus pour les deux modèles étudiés : le modèle de *Drift-diffusion* combiné avec le modèle d'ionisation de *Selberherr* et le modèle de *Energy-Balance* combiné avec le modèle d'ionisation de *Toyabe*.

Cette figure montre d'une part que la dépendance de la tension de claquage avec la concentration de dopage est non linéaire et d'autre part qu'une augmentation de la concentration de dopage provoque une réduction de la tension de claquage à la température ambiante. Elle diminue de 55,84V à 11.25V pour le premier modèle et diminue de 56,81V à 16.28V pour le deuxième modèle lorsque N_B augmente de 10^{16} cm^{-3} à $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

IV.3. Génération optique

IV.3.1. Principe de simulation

Dans cette section, nous sommes intéressés d'étudier l'impact de la température, le dopage, l'intensité de la lumière et la longueur d'onde sur les performances électriques de la photodiode à avalanche. Par implémentation du modèle de transport de Drift-diffusion combiné avec le modèle d'ionisation de Selberherr.

IV.3.2. Effet de l'intensité de la lumière sur la Caractéristique courant-tension

Dans la structure $N^+/P/P^+$ de la photodiode à avalanche représentée, si la paire électron-trou est générée dans la zone de déplétion alors elle génère un photocourant de conduction. Mais si la paire électron-trou est générée dans la région neutre de type P ou de type N et les charges ainsi générées arrivent par diffusion au bord de la zone de déplétion, alors on parle d'un photocourant de diffusion. Alors, Le photocourant total généré par les paires électron-trou, est également la somme entre le photocourant de conduction et le photocourant de diffusion.

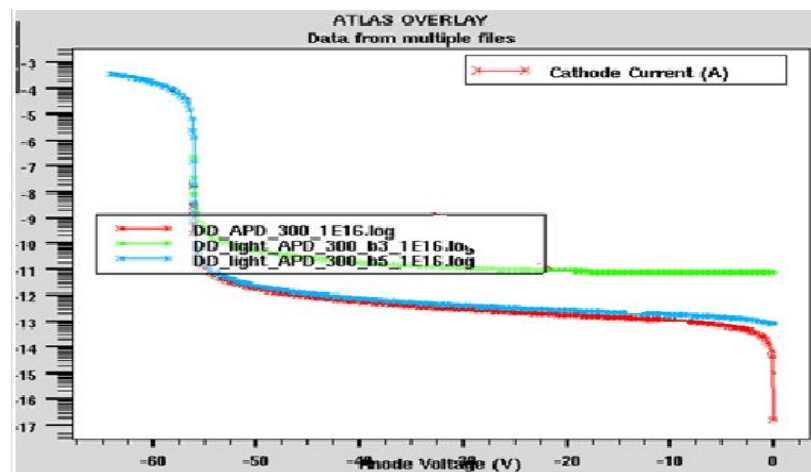


Figure .IV.7 : Effet de l'intensité de la lumière sur la Caractéristique courant-tension.

Dans la (figure IV.7) nous avons représenté la caractéristique $I-V$ de la photodiode sous obscurité et sous différents d'intensités éclairagements 10^{-3} W/m^2 et 10^{-5} W/m^2 . On voit qu'en tension inverse, la photodiode se comporte comme une source de courant. Aussi le photocourant est pratiquement indépendant de la tension inverse appliquée (tension de polarisation < de la tension de claquage). Mais, il atteint des valeurs maximaux près de la tension de claquage (effet d'avalanche).

L'intensité d'éclairement a un effet direct sur le photocourant généré. Ce dernier est proportionnel au rayonnement incident.

IV.3.3.Effet du dopage sur le gain de multiplication

L'augmentation de la concentration du dopage dans la zone de multiplication, crée une augmentation du champ électrique dans la zone de déplétion (voir section IV.2.2.1). Les porteurs de charge en transit dans la région de déplétion sont fortement accélérés. Lorsque le champ électrique atteint une certaine valeur, suffisamment élevée, des porteurs secondaires vont être générés par chocs ionisants avec le matériau. Ces porteurs sont à leur tour accélérés et peuvent générer de nouvelles paires électron-trou. La réaction en chaîne qui en résulte définit un coefficient de multiplication important appelé gain de multiplication. C'est le phénomène de multiplication par avalanche (Figure IV.8).

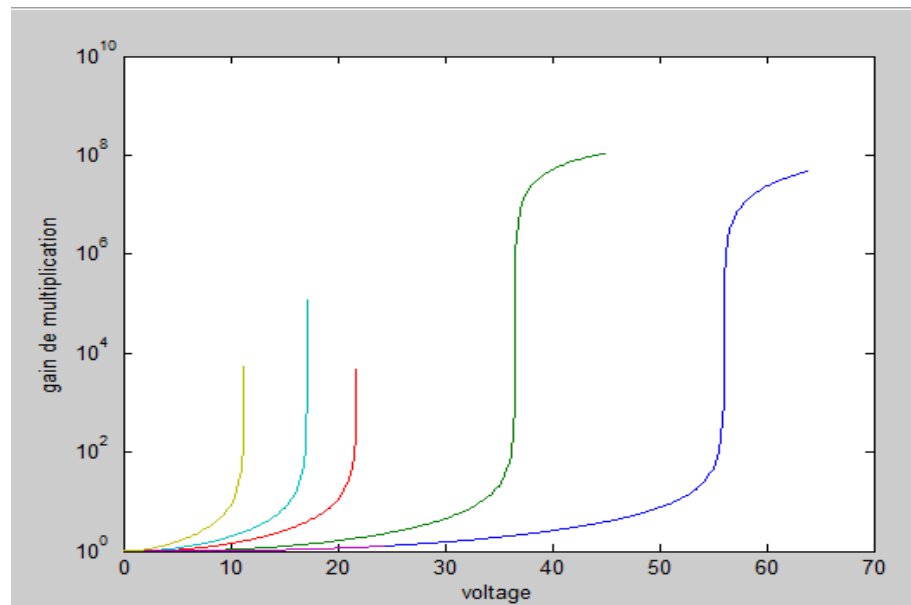


Figure .IV.8 : Gain de multiplication en fonction de la tension de la polarisation pour différente valeur de la concentration du dopage 10^{16} cm^{-3} à $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

La (figure IV.8) représente la variation du gain de multiplication en fonction de la tension de polarisation inverse pour une photodiode à avalanche pour différente valeur de la concentration du dopage de 10^{16} cm^{-3} à $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. L'évolution des caractéristiques gain-tension dans la figure montre l'effet de la concentration du dopage sur la tension du claquage. Cette dernière correspond à chaque structure en utilisant successivement les différentes valeurs des concentrations du dopage 10^{16} cm^{-3} , $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 10^{17} cm^{-3} , $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$. Nous avons trouvé que la tension de claquage diminue lors qu'on

augmente la concentration du dopage de la zone de multiplication. Elle diminue de 55V à 11V lorsque N_B augmente de 10^{16} cm^{-3} à $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$.

Cette figure illustre que l'augmentation de la concentration de dopage permet d'obtenir un gain de multiplication assez important à une tension de polarisation réduite.

Par exemple : Dans le cas d'une photodiode à avalanche avec une concentration de la zone de multiplication $N_B = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, le gain de $M=100$ correspond à une tension de polarisation $V=55\text{V}$. Par contre, pour une concentration de la zone de multiplication $N_B = 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, le gain de $M=100$ correspond à une tension de polarisation $V=11\text{V}$.

Alors, on peut conclure que le cas le plus favorable pour maximiser le gain de multiplication et minimiser la tension de polarisation est d'augmenter la concentration du dopage dans la zone de multiplication.

IV.3.4.Effet de la température sur le gain de multiplication

Dans cette section, la tension de claquage est le gain de multiplication sont estimés en utilisant le modèle de Drift-diffusion combiné avec le modèle d'ionisation de Selberherr afin d'évaluer les performances d'APD à différents niveaux de température. Le gain de multiplication, obtenu avec ce modèle combiné, et prévu pour différentes températures comprises entre $T = 253^\circ \text{ K}$ et 333° K , sont illustrés sur la (figure IV.9).

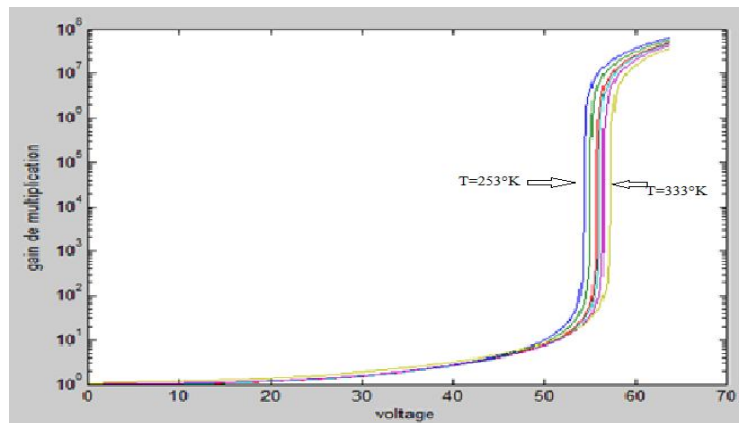


Figure. IV.9 : Gain de multiplication en fonction de la tension de la polarisation pour différente valeur de température 253°K à 333°K.

L'évolution des caractéristiques gain-tension dans la figure montrent l'effet de la température sur la tension du claquage. Nous avons trouvé que la tension de claquage est

légèrement augmentée lorsqu'on augmente la température. Elle augmente de 54V à 58V lorsque la température augmente de 253°K à 333°K.

Cette figure illustre que la diminution de la température permet d'obtenir un gain de multiplication assez important à une tension de polarisation réduite.

Par exemple : Dans le cas d'une photodiode à avalanche simulée à une température de 333°K, le gain de $M=100$ correspond à une tension de polarisation $V=58V$. Par contre, pour une température réduite de 253°K, le gain de $M=100$ correspond à une tension de polarisation réduite $V=54V$.

Alors, on peut conclure que le cas le plus favorable pour maximiser le gain de multiplication et minimiser la tension de polarisation est de minimiser la température.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, les deux modèles numériques de transport, *Drift-diffusion* combiné avec le modèle de *Selberherr* et le modèle de *Energy-Balance* combiné avec le modèle de *Toyabe*, ont été employés en introduisant l'effet de la température et la concentration du dopage pour la simulation numérique de la tension de claquage, dans les APDs de silicium. On a constaté que la diminution de la température et l'augmentation du niveau de dopage dans la région de multiplication réduisent la tension de claquage. En outre, le cas le plus favorable pour maximiser le gain de multiplication et minimiser la tension de polarisation est de minimiser la température et d'augmenter la concentration du dopage dans la zone de multiplication.