

CHAPITRE III :

Modélisation de l'effet du dopage et de la température sur la piézorésistivité

III.1 Introduction

a. Explication théorique de la piézorésistivité de silicium

L'effet piézorésistif du silicium a été démontré par Smith en 1954 [21]. Depuis, des jauges de déformation en silicium sont largement utilisées pour remplacer les jauges métalliques traditionnelles [22]. Il s'agit d'une variation de la résistivité d'un matériau en fonction des déformations de sa structure cristalline. Le silicium mono ou poly-cristallin possède une telle propriété. L'introduction de jauges piézorésistives dans la partie vibrante conduit alors à la mesure de certaines déformations [23].

Globalement, la variation de la résistivité du silicium cristallin sous l'effet d'une contrainte est engendrée par la modification de la structure cristallographique du silicium [24]. La contrainte appliquée provoque un changement de la bande d'énergie du semiconducteur, par conséquent, la mobilité des porteurs et la résistivité du matériau varient selon différentes orientations cristallographiques. Concernant le silicium poly-cristallin, à part la variation de la bande interdite, plusieurs facteurs contribuent aussi à l'effet piézorésistif : la température, la taille des grains, la résistance aux joints des grains, ... etc [22].

De nos jours, il n'y pas de modèle qui tient compte parfaitement de l'effet piézorésistif du silicium. Cependant, plusieurs hypothèses sont proposées en essayant d'expliquer et de modéliser le phénomène de la piézorésistivité, tout en intégrant les facteurs d'influence pour s'approcher des données empiriques. [25]

b. Jauge de déformation à effet résistif et piézorésistif

C'est la méthode la plus utilisée dans le domaine des capteurs de déformation. La déformation entraîne une variation proportionnelle de la résistance de la jauge, qui est ensuite traduite en signal par le circuit électronique. Les jauges de déformation sont constituées de différents matériaux tels que : les métaux, les semi-conducteurs, les oxydes et les polymères conducteurs. Ces dernières années, de nouveaux matériaux ont été utilisés pour mesurer la déformation avec une sensibilité largement plus élevée, comme les nanotubes de carbone et les fibres de carbone [22].

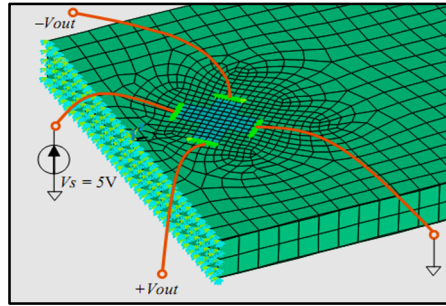


Figure III.1 : Schéma de principe du positionnement des jauges piézorésistives

III.2 Facteurs d'influence de la piézorésistivité

La propriété piézorésistive est caractérisée par les coefficients de piézorésistivité π , qui transforment la contrainte en variation de la résistivité du matériau ρ [22].

La piézorésistivité du silicium, qui se mesure en coefficient de piézorésistivité ou en facteur de jauge, est liée aux plusieurs paramètres géométriques ou électriques de la jauge. On peut donc ajuster la propriété piézorésistive de la jauge en silicium en contrôlant ces paramètres au cours du dépôt. Certains de ces facteurs jouent un rôle décisif sur la sensibilité d'une jauge piézorésistive [25].

III. 2. 1 Dopage

Le niveau du dopage a une influence plus importante sur la piézorésistivité du silicium. Le phosphore et le bore sont normalement utilisés pour doper le silicium en type N et P, respectivement. Empiriquement, la piézorésistance du type P démontre un facteur de jauge plus élevé que celui du type N. Par ailleurs, il est aussi prouvé expérimentalement que la piézorésistivité du silicium type P est moins dépendante de la température [22].

III. 2. 2 Température

Le coefficient de piézorésistivité diminue avec l'augmentation de la température ambiante. Le coefficient thermique de la résistance qui décrit le taux de variation de la résistance suite à une variation de la température, est considérablement réduit si le niveau de dopage est élevé. Autrement dit, la résistance en silicium fortement dopé est moins sensible à la variation de la température [22].

III. 2. 3 Effets combinés du dopage et de la température

Dans le but de faire une modélisation de l'effet du dopage et de la température sur la piézorésistivité par PSpice, on a utilisé comme repaire la variation de la conductivité dans un Silicium monocristallin pour mettre au point une formulation générale intégrant les paramètres du dopage et de la température à travers le facteur de piézorésistance $P(N, T)$ [26]. Ce facteur multiplicatif permet d'obtenir le coefficient de piézorésistivité $\pi_{l,t}(N, T)$ d'une résistance en Silicium se trouvant à la température T et ayant une concentration N , en dopants accepteurs ou donneurs, à partir de l'expression suivante [12] :

$$\pi_{l,t}(N, T) = \pi_{l,t}(10^{16}, 300^\circ K) \cdot P(N, T)$$

Où : $\pi_{l,t}(10^{16}, 300^\circ K)$ est un coefficient pris comme référence et $P(N, T)$ est un facteur de piézorésistance donné par la formule suivante [26] :

$$P(N, T) = \frac{300}{T} \frac{1}{\left(1 + \exp\left(\frac{E_f}{K_B T}\right)\right) \ln\left(1 + \exp\left(\frac{-E_f}{K_B T}\right)\right)}$$

E_f est le niveau de Fermi et K_B est la constante de Boltzmann.

La jauge piézorésistif se comporte comme une simple résistance dont l'importance dépend du dopage.

III.3 Notions de la mobilité

La mobilité est par définition une grandeur positive, elle mesure l'aptitude des porteurs à se déplacer dans le réseau cristallin. Elle est d'autant plus grande que le cristal est pur et que la masse effective des porteurs est faible. C'est un paramètre fondamental qui conditionne le fonctionnement des composants en haute fréquence. Sachant que pour une piézorésistance rectangulaire la relation exprimant la valeur de sa résistance s'écrit : [12]

$$R(T) = \rho(T) \frac{L}{S}$$

Où : ρ : est la résistivité ;

L : est la longueur ;

S : est la section.

Pour une piézorésistance de type P, la mobilité des porteurs intervient dans l'expression de $\rho(T)$ à travers la relation :

$$\frac{1}{\rho(T)} = q\mu_p(T)N_A$$

Où : q est la charge élémentaire, $\mu_p(T)$ est la mobilité des trous (porteurs majoritaires) et N_A la concentration des dopants accepteurs.

A partir des deux équations précédentes, on obtient :

$$R(T) = \frac{1}{q\mu_p(T)N_A} \frac{L}{S}$$

Par ailleurs, sachant que la mobilité dépend du dopage et de la température, il est évident que $R(T)$ en dépend également. La forme de cette dépendance est liée au modèle utilisé pour rendre compte des phénomènes physico-électriques qui existent dans un cristal semi-conducteur. Le modèle choisi et utilisé dans ce travail est dit **ARORA**.

III.4 Modèle d'ARORA

La mobilité en fonction du dopage et en fonction de la température est donnée par ARORA, par l'expression [12] :

$$\mu = \mu_{mn} + \frac{\mu_{0n}}{1 + \left(\frac{N_T}{N_{cn}}\right)^\theta}$$

➤ Pour le type P :

$\mu_{mn} = 88 \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.57} (cm^2/V.S)$: est la valeur minimale de la mobilité.

$\mu_{0n} = 1250 \left(\frac{T}{300}\right)^{2.33} (cm^2/V.S)$: est la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de la mobilité.

$N_{cn} = 1.26 \times 10^{17} \left(\frac{T}{300}\right)^{2.4} (cm^{-3})$: est la concentration de référence.

$\theta = 0.88 \left(\frac{T}{300}\right)^{-0.146}$: est un facteur exponentiel.

La relation de la mobilité des trous est valable dans la gamme de température 150 – 400°K.

L'équation de la mobilité du modèle d'ARORA montre la dépendance de μ avec la température et le dopage, par conséquent, il est intéressant de cerner leurs effets sur cette mobilité.

III.4.1 Variation de la mobilité en fonction du dopage

Le macromodèle de la mobilité en fonction du dopage pour le silicium type P est schématisé par le montage fonctionnel représenté par la figure suivante :

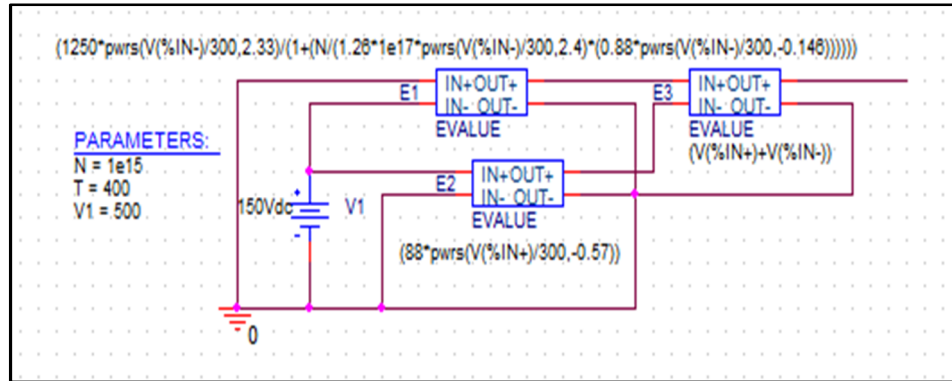


Figure III.2 : Macromodèle de la mobilité en fonction du dopage

Tenant compte de l'expression de la mobilité, le modèle de base sera représenté par un agencement de trois primitives EVALUE associés pour délivrer en sortie une tension qui modélise la mobilité.

Nous modélisons la température par une source de tension V_1 égale en Volt à la température en degrés kelvin [$^{\circ}\text{K}$].

Afin de pouvoir intervenir sur la fonctionnalité du modèle avant de le valider, il est préférable de déclarer les termes constants, tels que : le dopage N , la température T et la tension V_1 , sous forme de paramètres grâce à l'instruction **SPECIAL PARAM** de Pspice. Ces paramètres sont accessibles pour une éventuelle modification directement de la rubrique **PARAMETERS** sur le schéma saisi.

Pour avoir la variation en fonction du dopage et la température comme deuxième paramètre, on définit N comme paramètre primaire et V_1 comme paramètre secondaire.

La figure III.3 représente la variation de la mobilité des trous en fonction du dopage pour différentes températures.

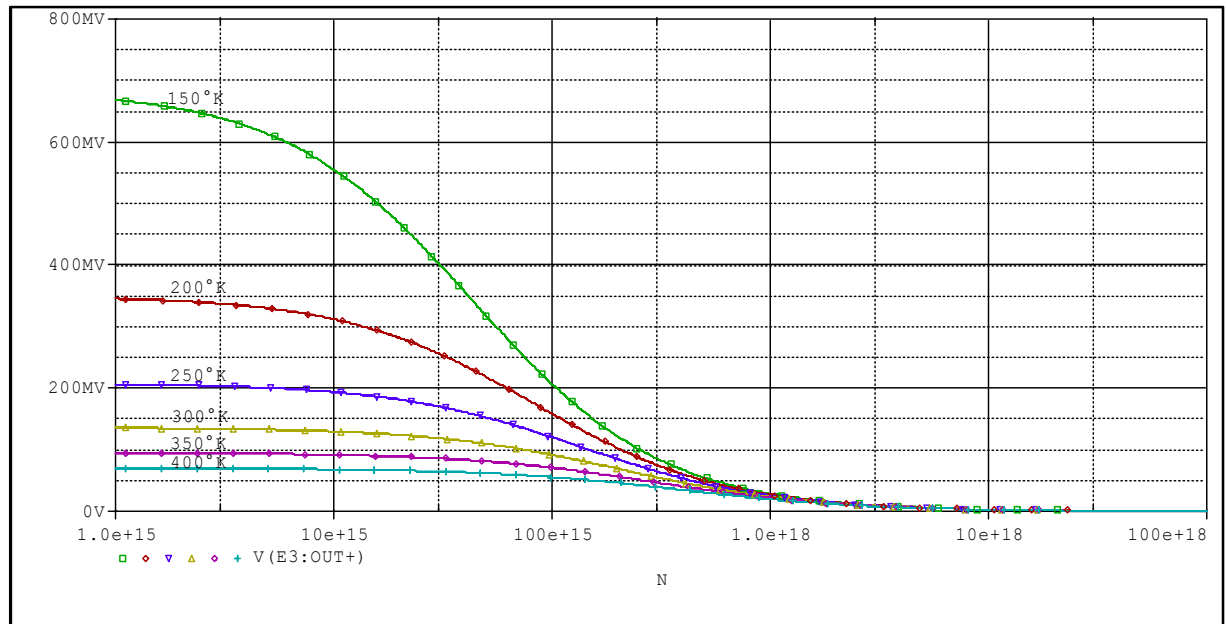


Figure III.3 : Variation de la mobilité des trous en fonction du dopage pour différentes températures

- L'examen de la figure montre que la mobilité est plus grande pour les faibles concentrations, et qu'elle diminue pour des concentrations élevées.
- L'influence de la température sur la mobilité est importante pour les faibles concentrations, mais elle n'a pas un grand effet pour les forts dopages.

III.4.2 Variation de la mobilité en fonction de la température

Le macromodèle représentatif de la mobilité en fonction de la température pour le silicium type P est illustré dans la figure III.4. Ce modèle est identique au précédent montage, mais dans ce cas la variation se fait en fonction de la température en variant le dopage N comme paramètre secondaire. Donc on obtient la variation de la mobilité en fonction de la température pour différents dopages (Fig.III.5).

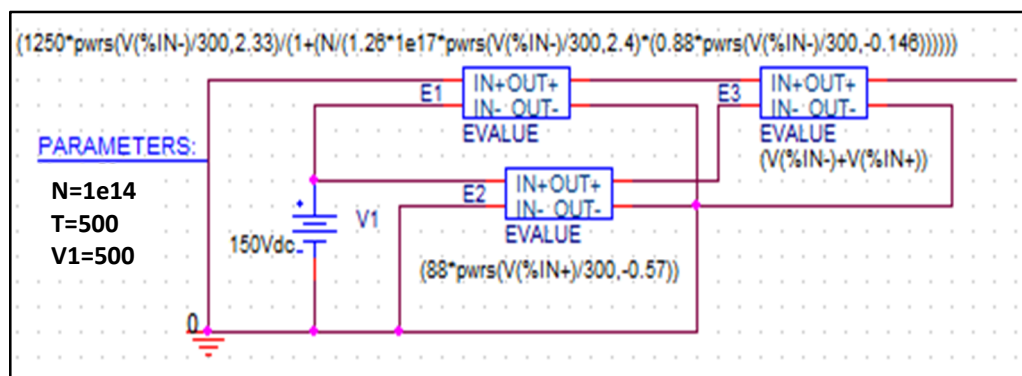


Figure III.4 : Macromodèle de la mobilité en fonction de la température

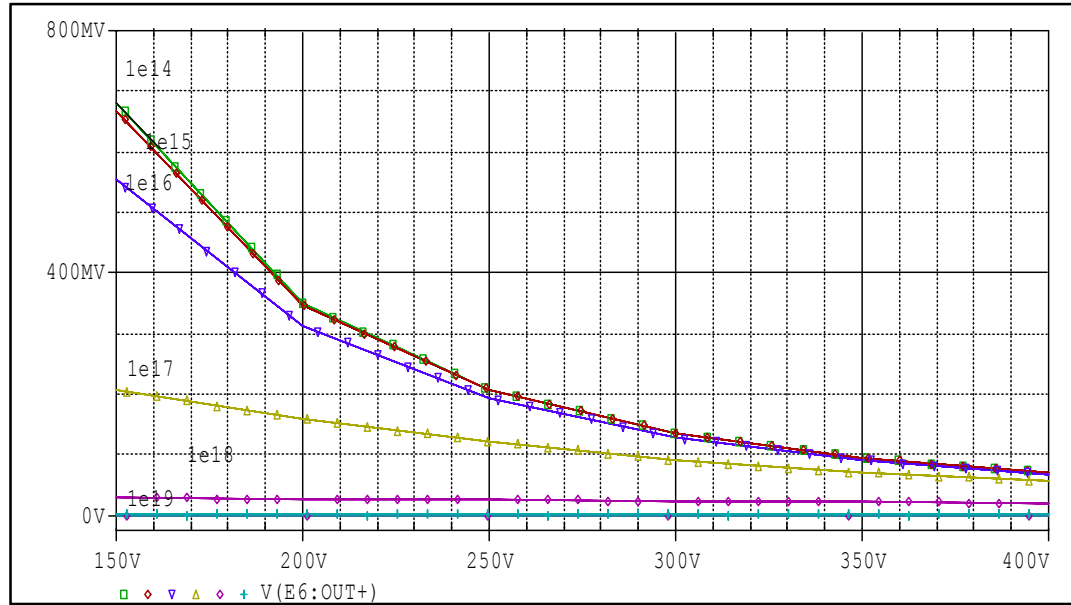


Figure III.5 : Variation de la mobilité des trous en fonction de la température pour différents dopages

- Pour une température varie entre 150°K et 400°K, on constate que la mobilité diminue sachant qu'elle se stabilise à un dopage de 10^{19} cm^{-3} .
- De plus, on constate que la mobilité est plus importante à faibles concentrations et à très basses températures.

III.4.3 Variation de la résistivité en fonction du dopage

La résistivité varie en fonction de la mobilité suivant l'équation :

$$\rho(T) = \frac{1}{q\mu_P(T)N_A}, \text{ pour un silicium type P}$$

A partir du modèle de la mobilité, on peut concevoir le macromodèle de la résistivité en associant l'expression précédente au bloc fonctionnel. On obtient alors la variation de la résistivité en fonction du dopage, sachant que la température est prise comme paramètre secondaire.

Le macromodèle de la résistivité en fonction du dopage est représenté par la figure III.6.

La figure III.7 représente la variation de la résistivité en fonction du dopage pour différentes valeurs de températures.

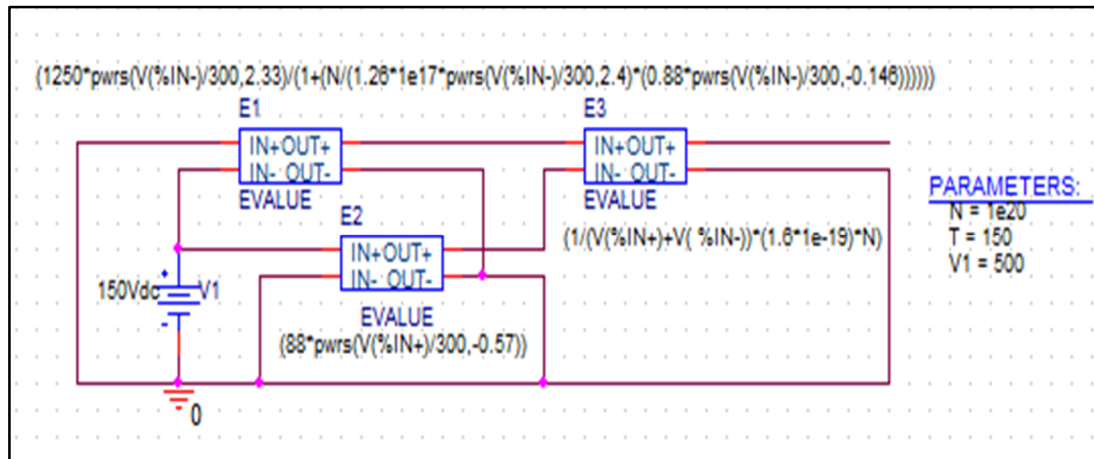


Figure III.6 : Macromodèle de la résistivité en fonction du dopage

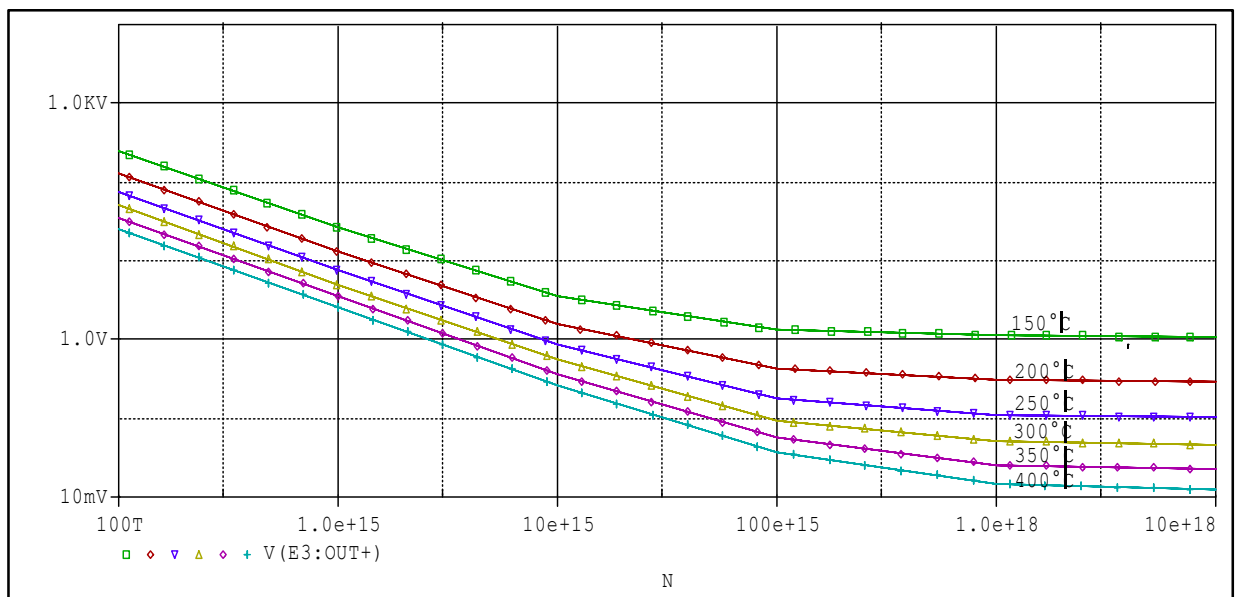


Figure III.7 : Variation de la résistivité en fonction du dopage pour différentes températures

- La résistivité électrique des résistances semi-conductrices varie de façon considérable en fonction de la concentration en impuretés. En effet, plus en dopant, plus la résistivité diminue. Donc, on peut jouer sur les valeurs des résistances semi-conductrices par le choix du dopage correspondant.

Cette propriété est d'un intérêt fondamental pour la technologie, car la concentration des impuretés peut être contrôlée lors de la fabrication des composants électroniques.

- L'effet de la température est important pour les faibles dopages, contrairement à forts dopages où la résistivité diminue.

III.4.4 Variation de la résistivité en fonction de la température

Le macromodèle de la résistivité en fonction de la température est identique au précédent montage (celui de la figure III.6), dans ce cas le dopage varie comme paramètre secondaire. Le modèle comportemental de la résistivité en fonction de la température est représenté par la figure III.8.

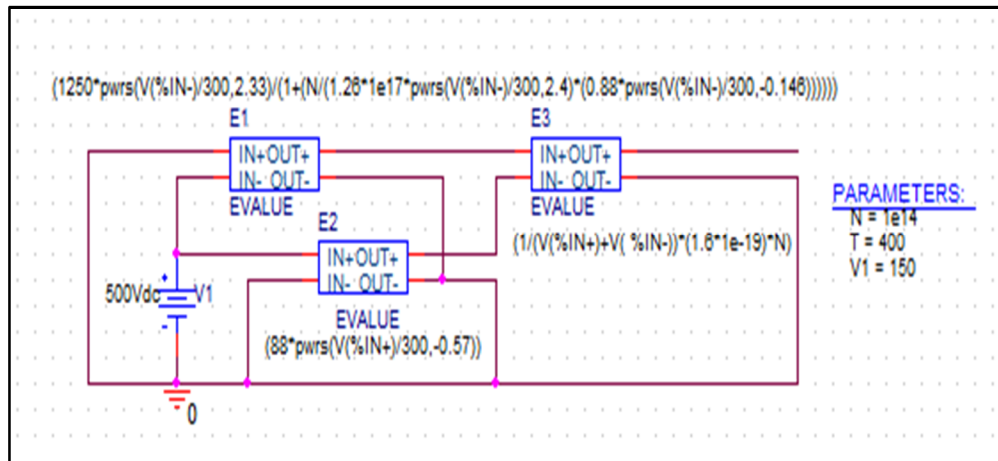


Figure III.8 : Macromodèle de la résistivité en fonction de la température

Ce montage permet de tracer la variation de la résistivité en fonction de la température pour différents dopages (Fig. III.9).

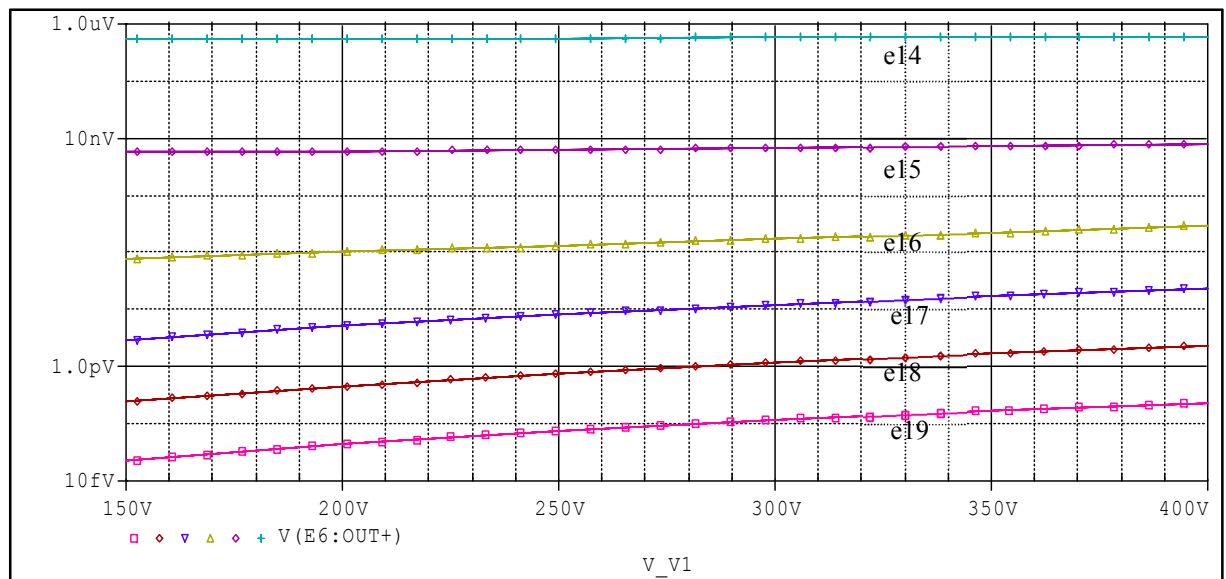


Figure III.9 : Variation de la résistivité en fonction de la température pour différents dopages

- Sur une gamme importante de la température, incluant la température ambiante ($T = 300$ K), la résistivité augmente légèrement avec l'augmentation de la température (elle est presque constante) et diminue quand la concentration des dopants augmente.

En effet, ce résultat est en bon accord avec le résultat trouvé par le modèle ARORA, dont la résistivité augmente avec l'augmentation de la température et diminue avec l'augmentation du dopage (Fig. III.10).

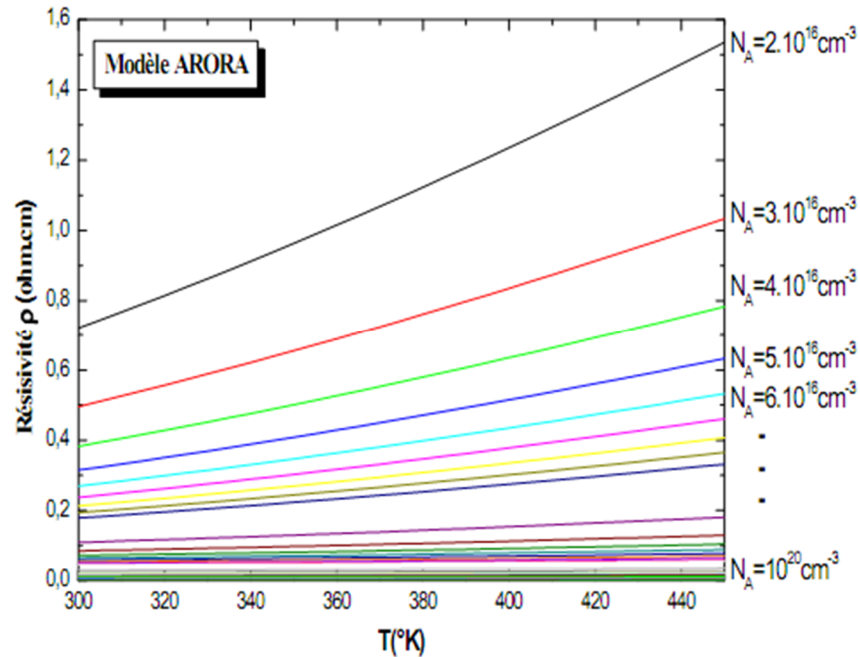


Figure III.10 : Variation de la résistivité du silicium type P en fonction de la température pour différents dopages (Modèle ARORA) [12]

III.5 Conclusion

Dans ce présent chapitre, nous avons étudié un paramètre technologique très important dans le domaine de la microélectronique, qui est la mobilité.

Nous avons tracé la variation de la mobilité en fonction du dopage pour différentes températures, et la variation de la mobilité en fonction de la température pour différents dopages. A faibles concentrations des dopants, la mobilité des trous est maximale, puis elle diminue quand la concentration des dopants augmente.

Il est clair aussi, que la mobilité est importante à basses températures mais elle diminue à températures élevées.