

## CONTRIBUTION A L'IDENTIFICATION DES PHENOMENES PERTURBANT L'IDEALITE DU FONCTIONNEMENT DES CAPTEURS DE PRESSION PIEZORESISTIFS AU SILICIUM

Reçu le 24/10/2005 – Accepté le 10/12/2008

### Résumé

Dans cet article, nous présentons une approche théorique basée sur des modèles de mobilité dans le silicium monocristallin dopé par des atomes accepteurs (piézorésistance type P), l'objet et d'analyser les deux coefficients de température de premier et deuxième ordre ( $\alpha$  et  $\beta$ ) en fonction du dopage.

Sachant que la mobilité dépend du dopage et de la température il est évident que les quatre piézorésistances du capteur de pression dépendent également. Utilisant quatre modèles de mobilité nous avons tracé la variation des deux coefficients sur une plage du dopage entre  $10^{17} \text{cm}^{-3}$  et  $10^{20} \text{cm}^{-3}$ .

Cette analyse se focalise aussi sur le comportement de la tension d'offset en fonction de la température. Elle permet de relier les coefficients thermiques étudiés à celui de la dérive thermique de la tension d'offset, nous avons tracé la variation de la tension d'offset en fonction de la température où nous avons comparé nos résultats avec le modèle expérimental présenté dans la littérature.

**Mots clés :** Silicium, capteur de pression, coefficient de température de premier et de deuxième ordre, tension d'offset.

### Abstract

In this paper, we present a theoretical approach based on models of mobility in the monocristalline-silicon doped by atoms acceptors (piézorésistance type P), the object and to analyze the two temperature coefficients, the first and second order according to doping concentration.

We know that mobility depends on doping concentration and the temperature, it is observed that the four piézorésistances of the pressure sensor also depend. Using four models of mobility we traced the variation of the two coefficients on a range of doping between  $10^{17} \text{cm}^{-3}$  and  $10^{20} \text{cm}^{-3}$ .

This analysis is also focused on the behavior of the offset voltage according to the temperature. It makes it possible to connect the thermal coefficients studied to that of the thermal drift of the offset voltage, we traced the variation of the offset voltage according to the temperature where we compared our results with the experimental model presented in the literature.

**Keys words :** silicon, pressure sensor, the first and second temperature coefficient, offset voltage.

M. RAS LAIN<sup>1</sup>  
A. CHAABI<sup>1</sup>  
A. BOUKABACHE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Département d'Electronique  
Faculté des Sciences de  
l'Ingénieur,  
Université Mentouri  
Constantine, Algérie.

<sup>2</sup>LAAS-CNRS,  
7 av Roche 31400  
Toulouse – CNRS  
France

ملخص

(P)  $\beta$   $\alpha$   
 $10^{20} \text{cm}^{-3}$   $10^{17} \text{cm}^{-3}$

الكلمات المفتاحية :

Depuis une dizaine d'années, de la technologie microélectronique dans le champ des capteurs et, en particulier celui des capteurs de pression au silicium monocristallin, le comportement électrique et thermique des jauges semi-conductrices (piézoresistances) occupe, en raison de leur large utilisation, une place de première importance [1][2][3][4][5].

Les capteurs de pression réalisés, spécialement ceux dont le fonctionnement est basé sur l'effet piézorésistif du Silicium, présentent un facteur de jauge élevé. Cette qualité se trouve généralement contrebalancée par certaines limitations, dont la plus importante est celle due à l'existence d'une tension d'offset et sa dérive thermique. Cette dernière conditionne le comportement électrique d'un capteur de pression lorsqu'il est soumis à un gradient de température. Les trois modèles qui ont été déjà utilisés [10] sont ceux dits de KLAASSEN [6], DORCKEL [7] et D'ARORA [8].

Dans ce travail nous avons ajouté un quatrième modèle de mobilité qui est le modèle de MASETTI [9], avec

$$\frac{\Delta V_0(T)}{V_A} = \frac{R_1(T_0)R_2(T_0)}{[R_1(T_0) + R_2(T_0)]^2} \left[ (\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T + (\beta_1 - \beta_2)\Delta T^2 \right] - \frac{R_3(T_0)R_4(T_0)}{[R_3(T_0) + R_4(T_0)]^2} \left[ (\alpha_3 - \alpha_4)\Delta T + (\beta_3 - \beta_4)\Delta T^2 \right] \quad (2)$$

lequel nous avons étudié le comportement des deux coefficients en fonction du dopage, à fin de choisir le modèle adéquat, la deuxième étape de cette analyse consiste à étudier et à évoluer le comportement en fonction de la température de la tension d'offset du pont de Wheatstone.

## 1. Principes de détection :

La filière explorée dans cette étude se base sur la fabrication d'une membrane à la surface de laquelle sont implantées quatre résistances électriquement connectées en pont de WHEATSTONE [1][2]. L'application d'une pression provoque des contraintes internes dans la membrane, ce qui modifie, à son tour, la valeur de chacune des quatre résistances. La sensibilité d'une telle structure dépend de la position des résistances et de leurs dopages. Quant à l'existence de la tension d'offset, elle peut être due à de multiples facteurs [5].

Le cas idéal d'un capteur de pression piézorésistif consiste en l'utilisation de quatre jauges de type P, de valeur égale, montées en pont de WHEATSTONE (figure 1).

La loi de variation en température de chacune des piézorésistances s'écrit sous la forme suivante [5] :

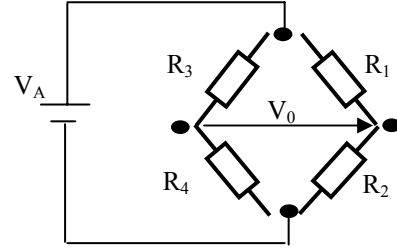
$$R(T) = R(T_0)(1 + \alpha\Delta T + \beta\Delta T^2) \quad (1)$$

Avec :  $\Delta T = T - T_0$

Où :

$\alpha$  et  $\beta$  : représentent respectivement les coefficients de température (TCR) du premier et du second ordre.

$R(T_0)$  : est la valeur de la piézorésistance à une température de référence  $T_0$ .



**Figure 1** : Les quatre piézoresistances électriquement connectées en pont de WHEATSTONE

La réponse électrique à l'excitation en pression devrait être alors une droite avec une tension d'offset nulle. Dans la pratique, il n'en est rien. Il existe toujours une valeur de tension non nulle pour une pression nulle. La connaissance de cette tension et de ses dérives thermiques est d'une importance primordiale dans la chaîne de mesure.

Cette tension de sortie s'écrit en fonction des variations de température de chacune des piézorésistances sous la forme suivante :

Avec  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  et  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ , représentent respectivement les coefficients de température de premier et deuxième ordre des résistances  $R_1, R_2, R_3$  et  $R_4$  du pont de Wheatstone. Dans cette étude nous présentons une approche théorique qui a pour objet l'analyse des deux coefficients de température du premier et du deuxième ordre  $\alpha$  (ppm/°C) et  $\beta$  (ppm/°C<sup>2</sup>) des piézorésistances.

Notre analyse est basée sur l'étude de la mobilité qui est un paramètre électrique très important d'un matériau semi conducteur et qui est liée directement aux ces deux coefficients de température.

## 2. Etude de la mobilité

La mobilité est par définition une grandeur positive 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 piézoresistance rectangulaire la relation exprimant la valeur de sa résistance s'écrit :

$$R(T) = \rho(T) \frac{L}{S} \quad (3)$$

Où :

$\rho(T)$  est la résistivité électrique.

$L$  : Longueur du piézorésistance.

$S$  : section de la piézorésistance.

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

$$\frac{1}{\rho(T)} = q \mu_p(T) N_A \quad (4)$$

Où :

$q$  est la charge élémentaire.

$\mu_p(T)$  est la mobilité des trous (porteurs majoritaires) et  $N_A$  la concentration des dopants.

Introduisant l'équation (4) dans l'équation (3) on obtient :

$$R(T) = \frac{1}{q \mu_p(T) N_A} \frac{L}{S} \quad (5)$$

Avec  $\frac{L}{S} = \text{cte}$ , par les modèles utilisés, on détermine la variation thermique de la mobilité pour chaque dopage donné et faisant l'identification de l'équation (5) avec l'équation (1) on déduit facilement par la méthode d'interpolation les deux coefficients de température  $\alpha$  et  $\beta$ .

## 2.1. Modèle de KLAASSEN :

La variation de la mobilité en fonction de la température est donnée par l'expression suivante [6]:

$$\mu_{i,L} = \mu_{\max} \left( \frac{300}{T} \right)^{\theta_i} \quad (6)$$

Où :

$\mu_{i,L}$  est la mobilité due aux phonons acoustiques ; elle est inversement proportionnelle à la température.

$\mu_{\max}$  : la mobilité maximale.

L'indice  $i$  désigne le type des porteurs.

La valeur de coefficient  $\theta_i$  est définie pour les deux types de porteurs :

$\theta_i = 2.247$  pour un semi-conducteur de type P.

$\theta_i = 2.285$  pour un semi-conducteur de type N.

La mobilité des porteurs majoritaires a été définie par l'équation suivante:

$$\mu_{i,I}(N_I) = \mu_{i,N} \left( \frac{N_{\text{ref},I}}{N_I} \right)^n + \mu_{i,c} \quad (7)$$

Avec :

$$\mu_{i,N} = \frac{\mu_{\max}^2}{\mu_{\max} - \mu_{\min}} \left( \frac{T}{300} \right)^{3n-1.5} \quad (8)$$

et

$$\mu_{i,c} = \frac{\mu_{\min} \mu_{\max}}{\mu_{\max} - \mu_{\min}} \left( \frac{300}{T} \right)^{0.5} \quad (9)$$

$\mu_{\min}$  : la mobilité minimal.

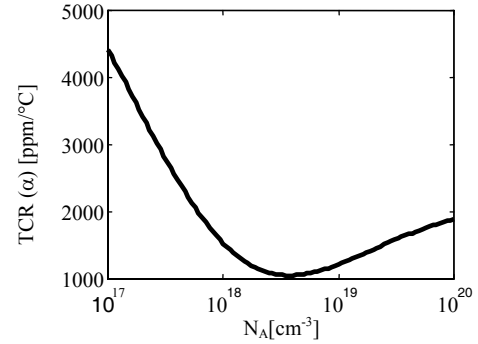
Les coefficients  $\mu_{\max}$ ,  $\mu_{\min}$ ,  $N_{\text{ref},I}$ ,  $n$  sont données par [6].

Finalement la mobilité résultante est:

$$\mu_i = \left( \frac{1}{\mu_{i,L}} + \frac{1}{\mu_{i,I}} \right)^{-1} \quad (10)$$

### 2.1.1. Coefficient de température du premier ordre ( $\alpha$ ) :

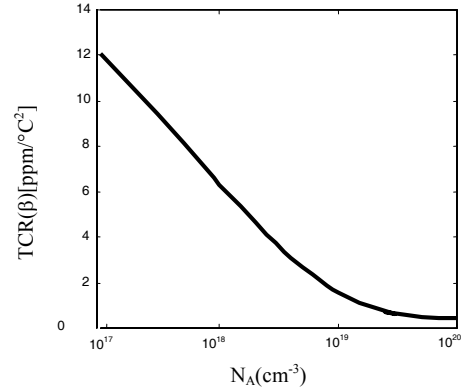
Nous avons tracé sur la figure 2 la variation du coefficient thermique du premier ordre en fonction du dopage à température ambiante



**Figure 2 :** Variation du TCR ( $\alpha$ ) en fonction du dopage.

### 2.1.2. Coefficient de température du second ordre ( $\beta$ ) :

Nous avons tracé sur la figure 3 la variation du coefficient de température du second ordre en fonction du dopage utilisant toujours le même modèle.



**Figure 3 :** Variation du  $\beta$  en fonction du dopage

## 2.2. Modèle de DORCKEL.

Le modèle de DORCKEL [7] permet de calculer les variations de la mobilité en fonction du dopage et en fonction des niveaux d'injections. Nous utilisons ce modèle afin d'étudier la mobilité en fonction du dopage pour des niveaux d'injection faible.

Ce modèle est décrit par les équations suivantes :

$$\mu_i = \frac{AT^{3/2} \left[ \ln \left( 1 + \frac{BT^2}{N} \right) - \frac{BT^2}{N + BT^2} \right]^{-1}}{N} \quad (11)$$

$\mu_i$  : mobilité des impuretés.

$N$  : Concentration des dopants.

$A$  et  $B$  sont des paramètres dépendant de la nature des dopants (Silicium type N ou type P).

$$\mu_L = \mu_{L0} \left( \frac{T}{300} \right)^{-\gamma} \quad (12)$$

Les vibrations thermiques des atomes perturbent la périodicité du cristal et empêchent le mouvement des porteurs. Cette mobilité est notée  $\mu_L$  ( $L$  = lattice).

$\mu_{L0}$  et  $\gamma$  dépendent de la nature des dopants et de la gamme de température et  $T$  varie entre 300 et 450°K.

$$\mu_{ccs} = \frac{2 \times 10^{17} T^{3/2} \left[ \ln \left( 1 + 8.28 \times 10^8 T^2 (pn)^{-1/3} \right) \right]^{-1}}{\sqrt{pn}} \quad (13)$$

$pn$  : Le niveau d'injection, on va le considérer dans notre étude constant et faible.

$$\mu = \mu_L \left[ \frac{1.025}{1 + \left( \frac{x}{1.68} \right)^{1.43}} - 0.025 \right] \quad (14)$$

$$x = \sqrt{\frac{6\mu_L (\mu_I + \mu_{ccs})}{\mu_I \mu_{ccs}}} \quad (15)$$

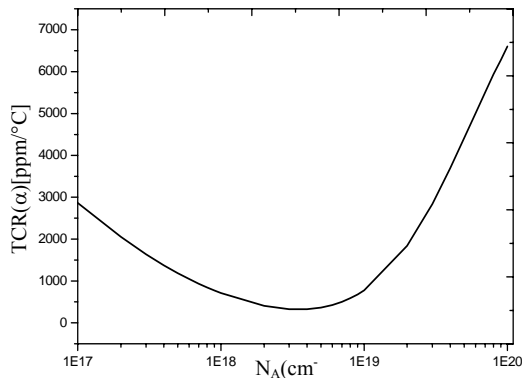
les valeurs numériques, des constantes sont :

$$\mu_{L0} = 495 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1}$$

$$\gamma = 2.2$$

$$A = 10^{17} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{S}^{-1} \cdot \text{K}^{-3/2}$$

$$B = 6.25 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-2}$$



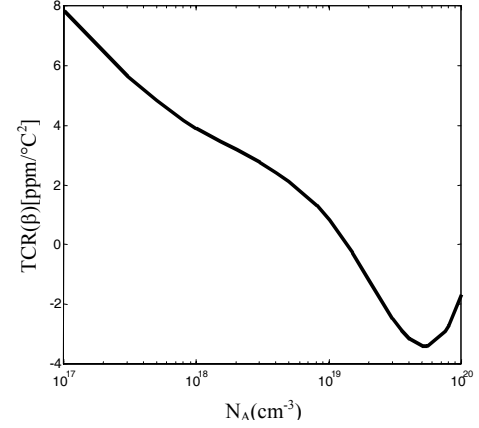
**Figure 4** : Variation du  $\alpha$  en fonction du dopage

### 2.2.1. Coefficient de température du premier ordre ( $\alpha$ ) :

Nous avons tracé sur la figure (4) la variation du coefficient thermique de premier ordre  $\alpha$ , en fonction du dopage à température ambiante.

### 2.2.2. Coefficient de température du second ordre ( $\beta$ ) :

Nous avons tracé sur la figure 5 la variation du coefficient de température du second ordre en fonction du dopage utilisant toujours le même modèle.



**Figure 5** : Variation du  $\beta$  en fonction du dopage

### 2.3. Modèle d'ARORA

La mobilité en fonction du dopage et en fonction de la température est donné par ARORA [8], par l'expression :

$$\mu = \mu_{mn} + \frac{\mu_{0n}}{1 + \left( \frac{N_T}{N_{cn}} \right)^\theta} \quad (16)$$

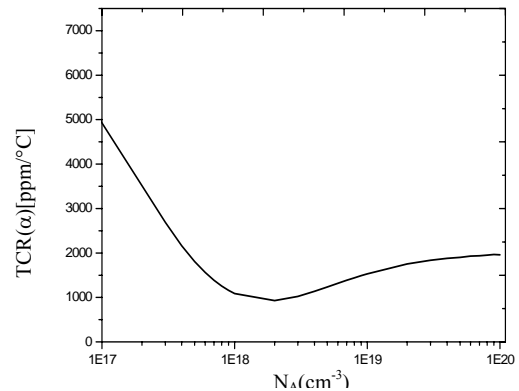
Où :

$$\mu_{mn} = 88 \left( \frac{T}{300} \right)^{-0.57} (\text{cm}^2 / \text{v.s}) \quad (17)$$

$$\mu_{0n} = 1250 \frac{T}{300}^{2.33} (\text{cm}^2 / \text{v.s}) \quad (18)$$

$$N_{cn} = 1.26 \times 10^{17} \left( \frac{T}{300} \right)^{2.4} (\text{cm}^{-3}) \quad (19)$$

$$\theta = 0.88 \left( \frac{T}{300} \right)^{-0.146} \quad (20)$$



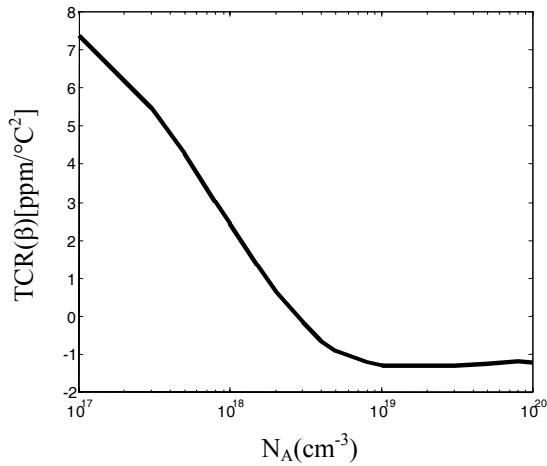
**Figure 6** : Variation du  $\alpha$  en fonction du dopage

### 2.3.1. Coefficient de température du premier ordre ( $\alpha$ )

Nous avons tracé sur la figure 6 la variation du coefficient thermique de premier ordre  $\alpha$ , en fonction du dopage à température ambiante.

### 2.3.2. Coefficient de température du second ordre ( $\beta$ )

Nous avons tracé sur la figure 7 la variation du coefficient de température du second ordre en fonction du dopage utilisant toujours le même modèle.



**Figure 7 :** Variation du  $\beta$  en fonction du dopage

## 2.4. Modèle de MASETTI

Masetti décrit son modèle de mobilité en fonction du dopage par l'expression suivante [9] :

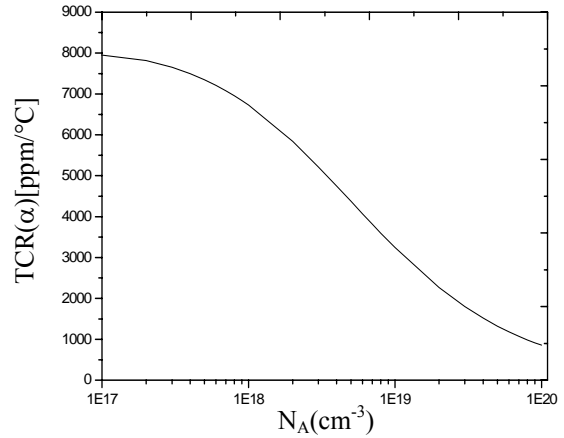
$$\mu_p = \mu_0 e^{-N_c / N} + \frac{\mu_{max}}{1 + (N / C_r)^a} - \frac{\mu_1}{1 + (C_s / N)^b} \quad (21)$$

Pour un silicium de type P dopé par des atomes de Bore, le tableau ci-dessous définit les valeurs des paramètres liés à l'expression de la mobilité :

$\mu_0$	$\mu_{max}$	$\mu_1$	$C_r$
44.9	470.5	29.0	$2.23 \times 10^{17}$
$C_s$	a	B	$P_c$
$6.10 \times 10^{20}$	0.709	2.09	$9.23 \times 10^{16}$

### 2.4.1. Coefficient de température du premier ordre ( $\alpha$ )

Nous avons tracé sur la figure 8 la variation du coefficient thermique de premier ordre  $\alpha$  en fonction du dopage.



**Figure 8 :** Variation du  $\alpha$  en fonction du dopage

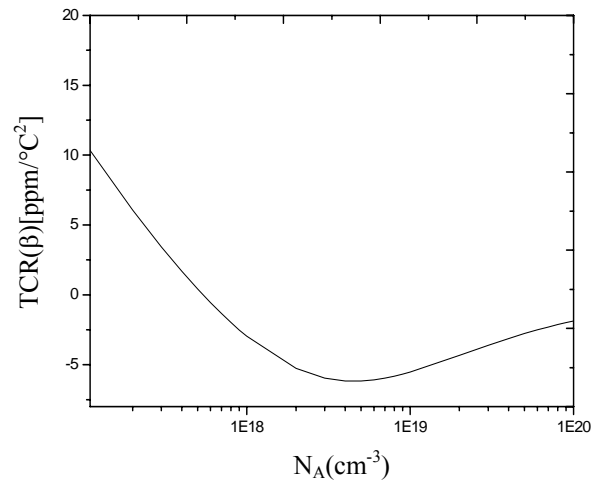
### 2.4.2. Coefficient de température du second ordre ( $\beta$ ) :

Nous avons tracé sur la figure 9 la variation du coefficient de température du second ordre en fonction du dopage utilisant toujours le même modèle.

## 3. DISCUSSION DES RESULTATS :

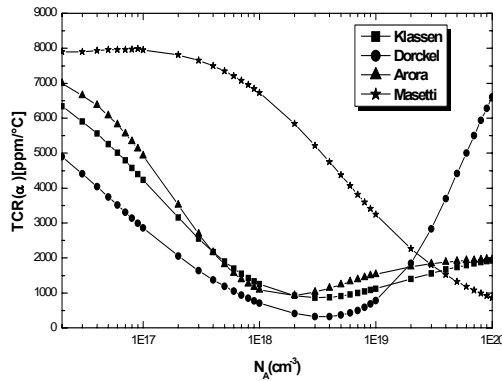
Les résultats obtenus montrent une importante variation des deux coefficients.

L'allure du coefficient du premier ordre  $\alpha$  obtenu par les quatre modèles de mobilité est presque la même, seulement dans le modèle de MASETTI dans toute la gamme de dopage ce coefficient présente des valeurs beaucoup plus grande que ceux obtenus avec les trois autres modèles ou la valeur de  $\alpha$  est minimale entre  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  et  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ .

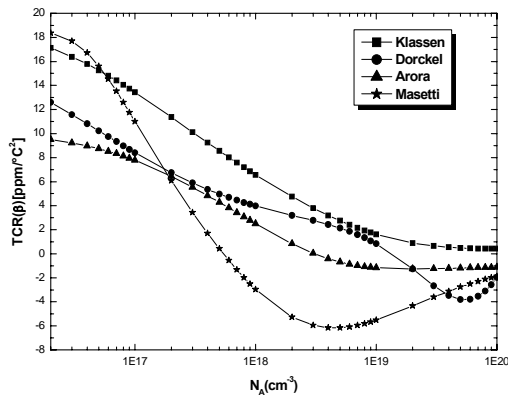


**Figure 9 :** Variation du  $\beta$  en fonction du dopage

Pour une étude comparative nous avons regroupés la variation des deux coefficients en fonction du dopage utilisant les quatre modèles (figures 10 et 11).

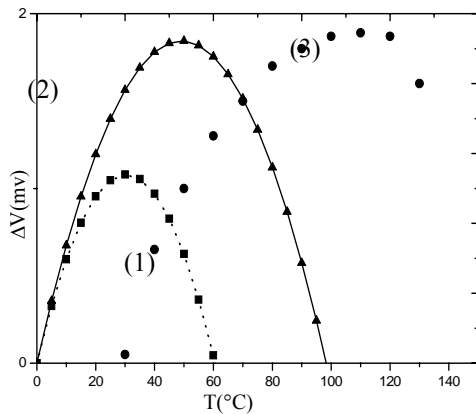


**Figure 10** : Variation de  $\alpha$  par les quatre modèles



**Figure 11** : Variation de  $\beta$  par les quatre modèles

Dans l'intervalle du dopage indiqué le coefficient du deuxième ordre  $\beta$  présente une variation de pente négative pour les quatre modèles, ces valeurs sont beaucoup plus petites dans les modèles de MASETTI et ARORA par rapport aux modèle de KLAASSEN et DORCKEL.



**Figure 12** : Variation de la tension d'offset en fonction de la température

- (1) --■-- Klaassen [6]
- (2) —▲— Dorckel et Leturcq [7]
- (3) ●●● Points expérimentaux [11]

#### 4. TENSION D'OFFSET

L'aspect important de la modélisation des capteurs de piézorésistifs a trait aux variations de variation de cette tension de décalage en fonction de la température, d'autre part l'évolution des deux coefficients de température  $\alpha$  et  $\beta$

en fonction du dopage, montre une faible variation pour les deux modèles Klaassen et Dorckel par rapport aux deux autres modèles, pour cela nous avons choisi les deux premiers modèles pour présenter la variation de la tension d'offset en fonction de la température à tension d'alimentation constante  $V_A = 5v$ .

L'examen de ces trois courbes de variation de la tension d'offset montre que :

➤ l'aspect parabolique prédomine quant la température varie entre :

- 0°C et 60°C pour le modèle de Klaassen.
- 0°C et 100°C pour le modèle de Dorckel
- 0°C et 120°C pour le modèle expérimental

➤ Une valeur maximal de la tension d'offset :

- 1mv à 25°C pour Klaassen.
- 1,75mv à 50°C pour Dorckel.
- 1,85mv à 110°C pour le modèle expérimental

#### CONCLUSION

Dans ce travail nous sommes attachés à étudier le comportement d'un capteur de pression piézorésistif et, en particulier, celui de ses deux coefficients de température.

Pour cela, nous avons adopté une méthode de travail graduelle nous permettant, après une étude thermoélectrique de la mobilité des porteurs majoritaires des jauges, d'aboutir aux deux coefficients de température.

En utilisant quatre modèles de mobilité, nous avons déterminé le comportement des deux coefficients en fonction du dopage, la détermination et l'évolution de ces deux coefficients reste une importance primordiale dans l'étude thermoélectrique de la réponse des capteurs de pression piézorésistifs au silicium monocristallin.

Malgré le décalage en température, la variation de la tension d'offset dans les deux modèles étudiés à la même allure par rapport au modèle expérimental, le modèle de DORCKEL et LETURCQ présente des valeurs plus proches que celles de l'expérimental.

#### REFERENCES

- [1] K.E.Petresen ,Silicon as a mechanical material,1982, proc.IEEE, Vol.70, n°5, pp 420-457
- [2] K. Matsuda, K. Suzuki and Y. Kanda, 1993, Design of a pressur sensor compensated for nonlinear piezoresistance effect, Proc. 7<sup>th</sup> Inter.Conf on Solid-State Sensors and Actuators , pp 221-223 Yokohama, Japan
- [3] H. J. Kress, F. Bantien, J. Merck, M. Willmann, 1991, Silicon pressure sensor with integrated CMOS signal conditioning circuit and compensation of temperature coefficient, Sensors and Actuators A, pp 21-26
- [4] V.I. Vaganov, 1991, construction problems in Sensors, Sensors and Actuators, A28, pp.161-172
- [5] S, Shirousu, S. Kimijima, S, Sato, Offset temperature drift of silicon pressure sensor, proc.2<sup>nd</sup> sensor sympos, Tsukuba, japan, 1982, pp 157-161

- [6] D.B.Klaassen, A unified mobility for device simulation I. Model equations and concentration dependence. Solid-state electronics vol,n 7,pp 953-959,1992
- [7] J.M Dorckel and PH. Leturcq, Carrier mobilities in Silicon Semi-Empirically related to temperature doping and injection level. Solid-state électronique,vol 24,n°9,pp 821-825, 1981.
- [8] N.D. Arora, J.R. Hauser, D.J. Rulson, IEEE transactions on Electron Devices, vol ED-29,p 292 (1982).
- [9] G. Masetti, M. Severi, and S. Solmi, "Modeling of carrier concentration in Arsenic-, Phosphorus-, and Boron-Doped Silicon," IEEE Transactions on electron devices, 1983, Vol. ED-30, NO 7, pp.764-769
- [10] A. Boukabache, P. Pons, "Doping effects on thermal behaviour of silicon resistor," electronics letters 28<sup>TH</sup> march 2002 vol. 38 N. 7, pp. 342-343.
- [11] A. Boukabache, P. Pons, G. Blasquez, Z. Dibi," Characterisation and modelling of the mismatch of TCRs and their effects on the drift of the offset voltage of piezoresistive pressure sensors," Sensors and actuators A, 2000, 84, pp 292-296