

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



UNIVERSITE DE MSILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE : GENIE ELECTRIQUE

OPTION : INSTRUMENTATION

Thème

**ETUDE ET CARACTERESATION
D'UN CAPTEUR DE PRESSION
PIEZORESISTIF**

Présenté par :
BOUGHRARA Bilal

Encadré par :
Dr. KEBAILI Farida

N° d'ordre : 2012/ / 85/125/

Promotion : JUIN 2012

Résumé

Il existe de nombreuses sortes de capteurs, permettant d'exploiter de façon ingénieuse les lois physiques à partir d'un relevé électrique. Nous nous sommes intéressés particulièrement au capteur de pression piézorésistif.

L'objectif de ce travail est l'étude et la modélisation des capteurs de pression piézorésistifs au silicium. Le corps d'épreuve de ce dispositif est une membrane fine au silicium parfaitement encastrée aux bords, soumise à une pression uniforme et constante. La modélisation de cette membrane est effectuée dans le cas des petites perturbations par la méthode de Galerkin, en vue de déterminer la solution de l'équation de Lagrange d'ordre 4 régissant la déflexion d'une plaque parfaitement encastrée aux bords . Par ailleurs, Une étude en fonction de la géométrie de la membrane a montrée les avantages et les inconvénients de chaque forme. Ce qui permet de donner au concepteur des critères de choix en fonction du domaine d'application souhaitée.

A partir des relations d'élasticité de Hooke reliant les contraintes et les déformations, les valeurs optimales des contraintes engendrées sur la membrane ont été déterminées. Les résultats de la modélisation obtenus ont été appliqués en premier lieu à un capteur de pression piézorésistif. Son principe est basé sur l'utilisation de jauges de contraintes piézorésistives diffusées, implantées ou déposées sur la membrane. L'emplacement des jauges et leurs orientations ont été choisies judicieusement afin d'obtenir une réponse optimale et linéaire ainsi qu'une valeur maximale de sensibilité du capteur.

Abstract

There are many kinds of sensors, to exploit an ingenious way the laws of physics from a record electric. We were interested particularly in piezoresistive pressure sensor.

The objective of this work is the study and modeling of piezoresistive pressure sensors in silicon. The test body of this device is a thin membrane of silicon perfectly flush with the edges, subjected to uniform pressure and constant. Modeling of this membrane is made in the case of small perturbations by the Galerkin method, to determine the solution of Lagrange's equation of order 4 governing the deflection of a plate perfectly flush to the edges. Furthermore, a study based on the geometry of the membrane has shown the advantages and disadvantages of each form. Thereby giving the designer selection criteria depending on the desired application domain.

From relationships between the Hookean stresses and strains, the optimal values of stresses generated on the membrane were determined. The modeling results obtained have been applied primarily to a piezoresistive pressure sensor. Its principle is based on the use of piezoresistive strain gauges diffused, placed or deposited on the membrane. The location of the gauges and their orientations were chosen carefully to obtain an optimal response and linear and a maximum sensitivity of the sensor.

Remerciements

Je remercie ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Mes remerciements vont également a mes chers parents qui m'ont toujours aidée et soutenue.

Je tiens remercier Dr. KEBAILI Farida, doctorat en électronique, pour m'avoir proposé ce sujet, pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifique et sa constante disponibilité. Il s'est toujours montré prêt à m'aider et à me prodiguer ses précieux conseils.

Je remercie également les membres du jury qui ont bien voulu examiner le présent travail.

J'adresse mes vives reconnaissances à tous les membres de la direction et les enseignants de département d'électronique.

BILAL

Dédicace

A

Ma mère

Ma mère

Ma mère

Mon père

Mes frères et soeurs

Mes nièces

Mes neveux

Toute la famille BOUGHRARA

Mes collègues et mes amis

BILAL

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	01
Chapitre I : GENERALITE SUR LES CAPTEURS DE PRESSION	03
I.1 Introduction.....	03
I.2 Définition d'un capteur.....	03
I.3 Caractéristique d'un capteur	04
I.3.1 Les erreurs de mesure.....	04
I.3.2-Etalonnage du capteur	04
I.3.3-La sensibilité	05
I.3.4-Rapidité- Temps de réponse.....	05
I.3.5 Finesse.....	05
I.4- constitution des capteurs de pression.....	05
I.5- classification des capteurs.....	06
I.5.1- Capteur actif	07
I.5.2- Capteur passif	09
I.6- le capteur de pression piezoresistif	10
I.7 - les jauges	12
I.8- jauge a semi-conducteur.....	12
I.9- conclusion.....	15
 Chapitre II : MODELISATION DE LA MEMBRANE	16
II.1 Introduction.....	16
II.2 –Etude des déformations de la membrane carrée / rectangulaire	16
II.3-Détermination de contraintes normales (σ_{xx} σ_{yy}) et de cisaillement σ_{xy} ...	20
II.4- Résultats de discussion	22
II.5-Membrane Carrée.....	22
II.6.- Etude d'une membrane rectangulaire	24
II.7 Conclusion.....	30

Chapitre III : Modélisation et conception du capteur de pression

III.1-Introduction.....	31
III.2-Etude des paramètres physico électrique des jauges	31
III.2.1-Etude du comportement thermique de la mobilité	31
III.2.1.1-Généralités sur les paramètres physiques de la mobilité.....	31
III.2.1.1.a-Mobilité	31
III.2.1.1.b-Résistivité	31
III.2.1.1.C-Résistance	32
III.2.1.2-Modèles de mobilité	33
III.2.1.2.a-Modèle de KLAASSEN.....	33
III.2.1.2.b-Modèle de DORCKEL	34
III.2.1.2.c-Modèle d'ARORA	34
III.2.1.2.d-Modèle MASETTI	34
III.2.3-Variation de la résistivité en fonction du dopage	35
III.2.4-Variations de la résistivité en fonction de la température	36
III.3- Description du capteur de pression piézorésistif	37
III.3.1.Choix du matériau	37
III. 3.2- propriétés du silicium monocristallin	38
III.3. 3- Principe de piézorésistivité dans le silicium monocristallin	39
III.3.4.Facteur de jauge	41
III.4- disposition des jauges sur la membrane	41
III.5- Principe de fonctionnement du pont	43
III.6- Conclusion	46
Conclusion générale	47
Résumé	
Références bibliographiques	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

La pression est une grandeur physique qui joue un rôle extrêmement important dans la plus part des applications industrielles modernes .C'est pourquoi il existe aujourd'hui de nombreux moyens pour mesurer ce paramètre tell que les capteurs de pression.

Une recherche approfondie dans le domaine de conception et réalisation des capteurs de pression piézorésistifs ou capacitifs traite de nombreux paramètres qui influent sur le bon fonctionnement de ces dispositifs, beaucoup de tentatives d'améliorations ont été consacré pour aboutir aux meilleurs conditions permettant le fonctionnement idéal des capteurs de pression.

A partir des années 1970 l'utilisation du silicium comme matériau de base à bouleversé les méthodes de conception de réalisation des capteurs de pression, ces capteurs sont retrouvés dans de nombreux domaines comme étant le premier maillon d'un système de contrôle ou de mesure.

Les capteurs de pression réalisés par les techniques spécialement ceux dont le fonctionnement est basé sur l'effet piézorésistif du silicium mono cristallin, l'utilisation du silicium mono cristallin nous permet ainsi d'obtenir des capteurs de petites dimensions de sensibilité et un facteur de jauge élevé et de coût modéré.

Les comportements électrique et thermique des jauges semi-conductrices occupent, en raison de leur large utilisation une place de première importance. Ainsi, pour les capteurs de pression au silicium mono cristallin.

Ce manuscrit est constitué de trois chapitres et il est organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, une étude bibliographique et définitions essentielles sont données en premier temps, ainsi qu'une description phénoménologique des propriétés électriques

Le deuxième chapitre sera consacré, en première partie, pour les bases théorique régissant le comportement mécanique de la membrane soumise à une pression

uniforme et constante. En seconde partie nous rappellerons la résolution de cette équation par la méthode de Galerkin ce qui permettra d'obtenir la déflexion $w(x, y)$ en tout point de la membrane ainsi que les contraintes, puis l'application de ces résultats de la déflexion et des contraintes obtenus à des capteurs de pression piézorésistifs.

Dans le troisième chapitre, nous avons développés analytiquement quatre modèles pour Etudier la résistivité ρ uniquement en fonction de deux paramètres électriques, la température et le dopage, ainsi concrétisé la modélisation de la membrane , en utilisant un capteur piézorésistif dotée de la membrane étudiée.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale ou seront rassemblés nos principaux résultats et quelques perspectives.

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LES CAPTEURS DE PRESSION

I.1- Introduction :

Le développement des techniques de la microélectronique a permis d'obtenir des composants électroniques plus perfectionnés .Une des conséquences de ce développement est la nouvelle génération des micro capteurs miniaturisés dérivés de la technologie des circuits intégrés sur Silicium. Ces micro capteur présentent un marché potentiel considérable dans de nombreux secteurs d'activité comme l'industrie, l'environnement, le biomédical.... grâce à leurs avantages : petite taille, possibilité d'une production de masse à bas prix et intégration.

d'un ou de plusieurs capteur avec le circuit de traitement du signal sur la même puce . Toutes ces qualités sont potentiellement distribuables à grande échelle.

Dans ce chapitre nous allons présenter des généralités sur les capteurs de pression. Nous avons commencé par la définition du capteur de pression, en suite nous nous sommes intéressons au capteur de pression piezoresistif, nous rappelons leur mode de fonctionnement .

I.2 - Définitions:

Le capteur est le dispositif qui soumis à l'action d'une grandeur physique non électrique (mesurande : température, pression, vitesse, ...) et présente une caractéristique de nature électrique (sortie S : tension, charge courant ou impédance) [1].

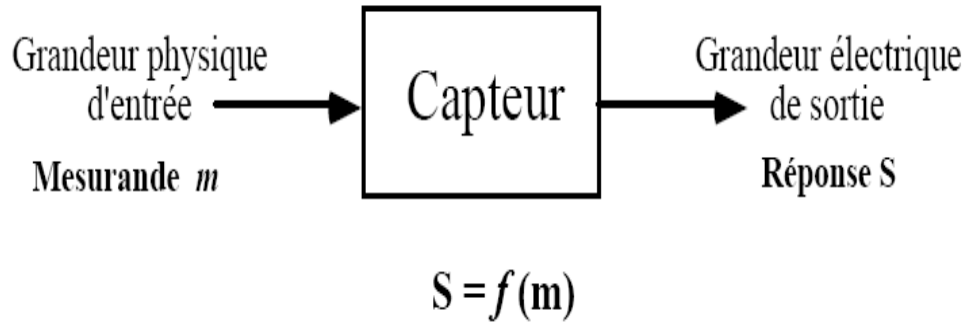


Fig. (I.1) : Schéma synoptique.

La relation $S=f(m)$ résulte dans sa forme théorique des lois physiques qui régissent le fonctionnement du capteur. Pour faciliter l'exploitation de la réponse, on s'efforce de réaliser des capteurs dont la relation $S=f(m)$ est linéaire. Dans ce cas S et m sont proportionnels.

$S=k \cdot m$ Où k est une constante.

I.3- caractéristiques du capteur [1]:

I.3.1-Les erreurs de mesure :

L'écart entre valeur mesurée et valeur vraie est l'erreur de mesure : celle ci est due en particulier aux imperfections de la chaîne de mesure qui dégradent l'information du signal.

I.3.2-Etalonnage du capteur :

Est une opération qui nous permet d'expliciter, la relation entre les valeurs du mesurande et la grandeur de la sortie, sous forme graphique ou algébrique.

I.3.3-La sensibilité :

C'est le rapport de la variation de la grandeur de sortie à la variation du mesurande:

$$S = \frac{\Delta S}{\Delta m}$$

I.3.4-Rapidité- Temps de réponse :

La rapidité permet d'apprécier de quelle façon la grandeur de sortie suit dans le temps les variations de mesurande. Un capteur est d'autant plus rapide que son temps de réponse est plus court.

I.3.5-Finesse :

Est définie par la valeur d'une grandeur physique qui dépend de la nature du capteur et qui détermine sa réaction avec le mesurande.

I.4- constitution des capteurs de pression :

De manière générale un capteur de pression est constitué de deux parties : une partie de détection appelée « Cellule sensible » qui contient le corps d'épreuve et le transducteur électrique et une partie de traitement de l'information appelée « Circuit électrique de traitement » ou encore « Circuit conditionneur » et éventuellement un circuit électronique de traitement figure (1.2). Le premier maillon transforme la pression en une grandeur mécanique qui peut être selon le type de capteur une contrainte, une déformation, un déplacement, etc....

le second convertit cette grandeur mécanique en un signal électrique qui sera ensuite analysé et traité par un circuit électronique afin d'obtenir une information exploitable par l'utilisateur.

Le choix des matériaux et principe utilisés pour les différentes parties dépendent de l'application visée et sont par ailleurs interdépendants [2] [3].

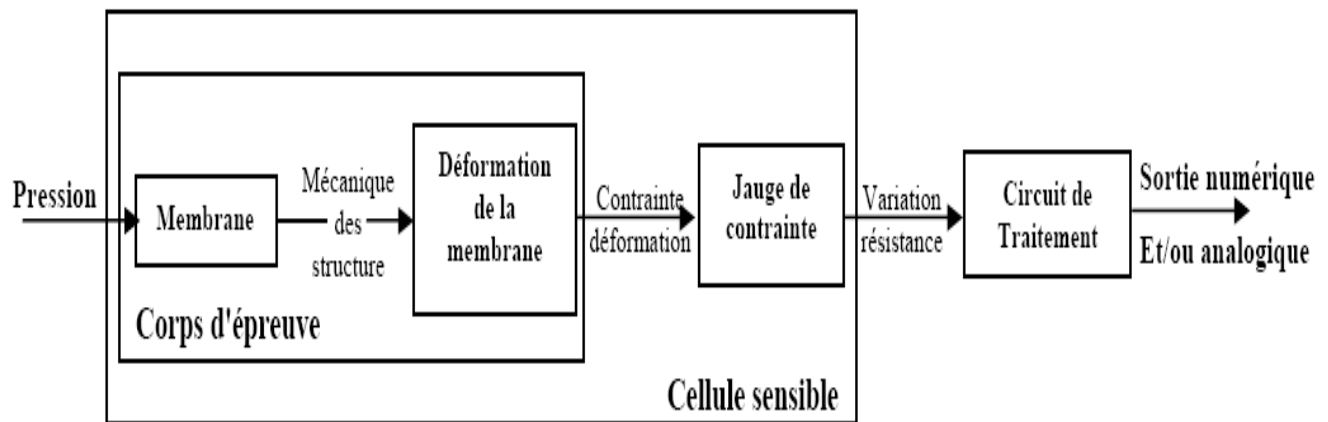


Fig. (I.2) : Schéma synoptique d'un capteur de pression.

I.5- classification des capteurs :

La diversité des types de capteur électrique actuellement utilisés, nécessite une classification suivant leur principe de fonctionnement. Elles peuvent être réparties en deux groupes principaux [1] :

- ☐ Capteur de pression actif.
- ☐ Capteur de pression passif.

I.5.1- Capteur actif :

Fonctionnant en générateur, un capteur actif est généralement fondé dans son principe sur un effet physique qui assure la conversion en énergie électrique de la forme d'énergie propre à la grandeur physique à prélever, énergie thermique, mécanique ou de rayonnement, Voir tableau (I.1).

Grandeur physique a mesuré	Effet utilise	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité	Tension
Température	pyroélectricité	Charge
Flux de rayonnement optique	Photo émission	Courant
Flux de rayonnement optique	Effet photovoltaïque	Tension
Flux de rayonnement optique	Effet photoélectrique	Tension
Force ou pression	Piézo-électrique	Charge
Accélération ou vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant) ou courant	Effet Hall	Tension

Tableau (I.1) : Capteur actif [4].

I.5.2- Capteur passif :

Il s'agit généralement d'impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible à la grandeur mesurée. La variation d'impédance résulte :

Soit d'une variation de dimension du capteur, c'est le principe de fonctionnement d'un grand nombre de capteur de position, potentiomètre, inductance à noyaux mobile, condensateur à armature mobile.

Soit d'une déformation résultant de force ou de grandeur s'y ramenant, pression accélération (armature de condensateur soumise à une différence de pression, jauge d'extensomètre liée à une structure déformable).

- L'impédance d'un capteur passif et ses variations ne sont mesurables qu'en intégrant le capteur dans un circuit électrique, par ailleurs alimenté et qui est son conditionneur, voir tableau (I-2).

Grandeur physique a mesuré	Caractéristique sensible	Matériaux utilisé
Température	Température	Métaux :platine,nickel,...
Très basse température	Constante diélectrique	Verre
Flux de rayonnement optique	Résistivité	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité	Alliage de nickel,Si dopé
Déformation	Perméabilité magnétique	Alliage ferromagnétique
Position (aiment)	Résistivité	Matériaux magnéto résistant
Humidité	Résistivité	Chlorure de lithium

Tableau (I.2) : Capteur passif [4].

Comme notre capteur à étudier est de type passif, nous sommes intéressés au capteur de pression piezoresistif.

I.6- le capteur de pression piezoresistif :

La figure (I.3) montre que le capteur de pression piézorésistif est basé sur quatre résistances en silicium (jauges semi-conductrices), connectées en pont de WHETSTONE. La valeur d'une de ces résistances est modifiée lorsque la pression est appliquée. La modification de résistance (et par conséquent la tension de sortie du pont) est linéaire et proportionnelle à la pression appliquée. Cela s'exprime sous forme d'équation linéaire contenant deux paramètres : Offset (le décalage) et S pan (la portée). L'offset est la tension de sortie lorsqu'une pression de zéro est appliquée, et le span est la tension de sortie lorsque la pression maximale est appliquée.

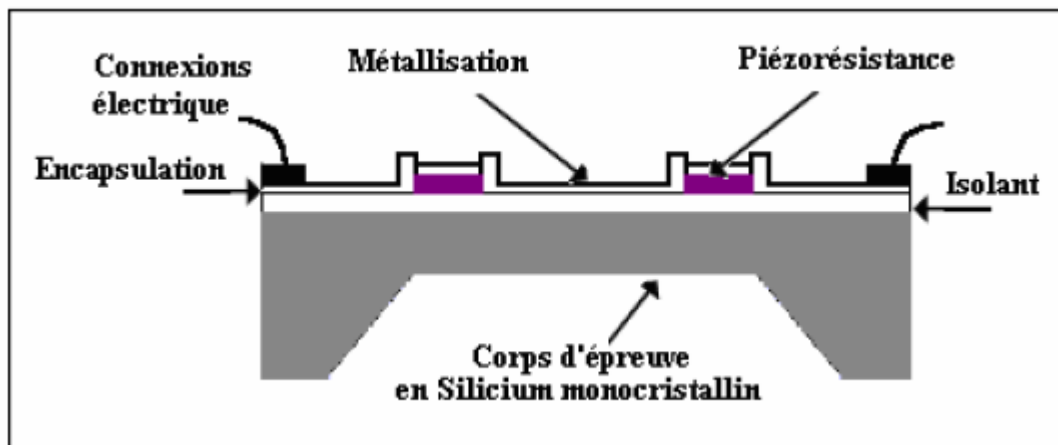


Fig. (I.3) : Capteur de pression piézorésistif.

I.7 - les jauges :

C'est un capteur passif traduisant, en variation de résistance électrique, sa propre déformation qui est en principe égale à celle de la structure à l'endroit où il est collé.

I.8- jauge à semi-conducteur [2]:

Il existe de très nombreux principes de transduction mais nous n'aborderons ici que les transducteurs les plus utilisés pour les capteurs de pression miniatures, c'est-à-dire les résistances.

Soit une résistance R de forme parallélépipédique constituée d'un matériau homogène de résistivité ρ_0 . Sa valeur au repos est donnée par :

$$R_0 = \rho_0 \frac{L}{S}$$

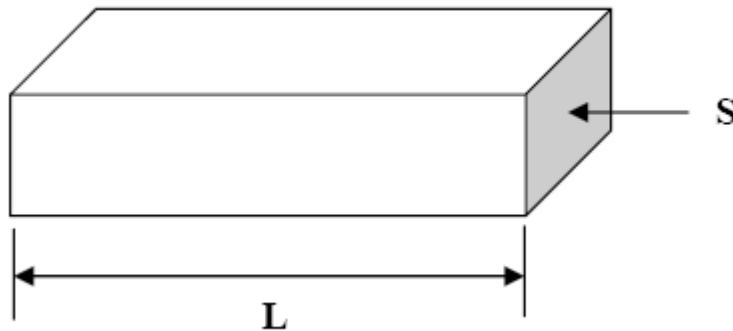


Fig. (I.4) : Résistance R de forme parallélépipédique.

Où L et S représentent respectivement la longueur et la section de la résistance et ρ_0 la résistivité du matériau. L'application d'une contrainte (déformation) introduit une variation de résistance ΔR :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta S}{S} \dots\dots\dots (I.1)$$

Les deux derniers termes de la relation (I.1) représentent les changements dimensionnels de la jauge ; ils sont prépondérants pour les métaux. Le premier terme représente une variation de résistivité qui est très largement dominant pour les semi-conducteurs : C'est l'effet piezoresistif.

Les contraintes dues à l'application d'une pression sont maximales au milieu du bord encastré de la membrane ; pour avoir une meilleure sensibilité à la pression il est clair que l'implantation des jauges sera au milieu des bords de la membrane.

La technique utilisée pour réaliser les jauges semi-conductrices est celle de l'implantation ionique ; cette dernière consiste à accélérer des impuretés ionisées avec un champ électrique, afin de leur conférer l'énergie nécessaire pour rentrer dans le matériau à doper. Plus un ion n'est accéléré, plus son énergie cinétique est grand, et donc plus il s'enfoncera profondément dans la membrane. Ainsi, en contrôlant la dose et l'énergie, on détermine le profil de dopage [5].

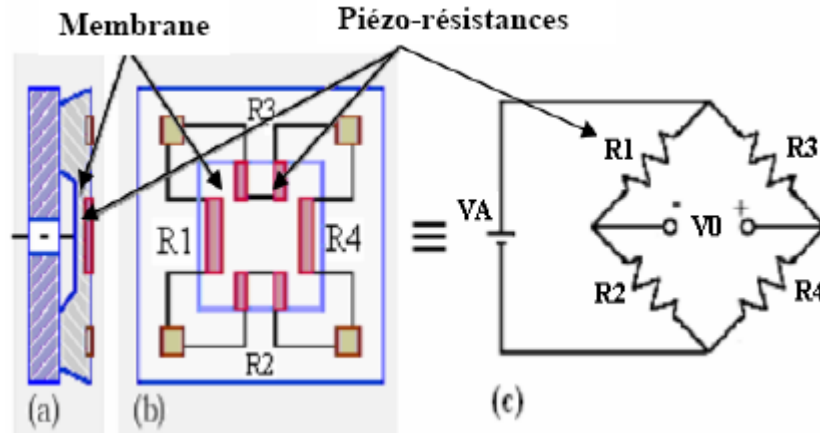


Fig. (I.5) Représentation des quatre piézoresistances implantées à la surface de la membrane de Silicium et connectées en pont de WEATSTONE.

Les quatre jauges sont implantées de façons identiques et connectées électriquement en pont de Wheatstone figure (I.5) et ils sont orientés de façon symétrique sur la membrane.

La tension de sortie du pont est la suivante :

$$V_0 = R_1 V_A / (R_1 + R_2) - R_3 V_A / (R_3 + R_4) \dots\dots\dots (I.2)$$

Dans le cas idéal cette tension est nulle, mais réellement il existe toujours une tension non nulle pour une pression nulle, cette dernière s'appelle « la tension d'offset ».

I.9- conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait un petit rappel sur l'architecture interne et le principe de fonctionnement générale d'un capteur de pression piézorésistif de type monocristallin nous prestons ces deux constitutions : le corps d'épreuve (membrane) et les jauges piézorésistances.

CHAPITRE II

MODELISATION DE LA MEMBRANE

II.1-Introduction

Dans cette partie, nous allons étudier le comportement mécanique d'une fine membrane de silicium, parfaitement encastree aux bords, soumise à une pression constante et uniforme dans le cas des petites perturbations.

Pour cela en partant d'un système différentiel régissant son mouvement, nous utilisons une approche semi-analytique basée sur le théorème des travaux virtuels, pour établir l'expression générale de la déflexion. Dans le cas où l'amplitude de cette dernière est de faible valeur devant l'épaisseur de la membrane, nous établissons les équations liants les contraintes de surface à la pression appliquée. Les résultats obtenus seront directement appliqués aux capteurs de pression piézorésistif.

II.2-Etude des déformations de la membrane carrée / rectangulaire :

L'étude de la déformation d'une membrane parfaitement encastree aux bords est très importante dans la réalisation des micros capteurs de pression. En effet la connaissance de la réponse d'une membrane, qui est le corps d'épreuve du micro capteur, à une excitation externe de pression, permet de déterminer ses caractéristiques et ses performances. La solution exacte de ce type de problème n'existe pas ; cependant plusieurs approches ont été proposées, notamment par les méthodes de Ritz, Raleigh et Galerkin [6].

Dans ce paragraphe nous nous intéressons à la résolution de l'équation aux dérivées partielles d'ordre 4, régissant la déformation d'une membrane fine de forme carrée (rectangulaire) au Silicium parfaitement encastree soumise à une pression statique uniforme (dans le cas des petites perturbations; où la déflexion $w(x, y)$ étant très petite devant l'épaisseur h de la membrane tel que : $w \ll h$).

La figure 2.1 représente une membrane de forme carrée (rectangulaire). C'est une micro structure orientée selon le plan cristallographique (110), collée sur un substrat d'orientation cristallographique (100) (voir la figure 2.2) [6,7]. Ses dimensions sont la longueur "a" suivant l'axe ox , la largeur "b" suivant l'axe oy et la hauteur "h" suivant l'axe oz . Avec l'hypothèse des plaques minces, nous avons $h \ll a$ et $h \ll b$.

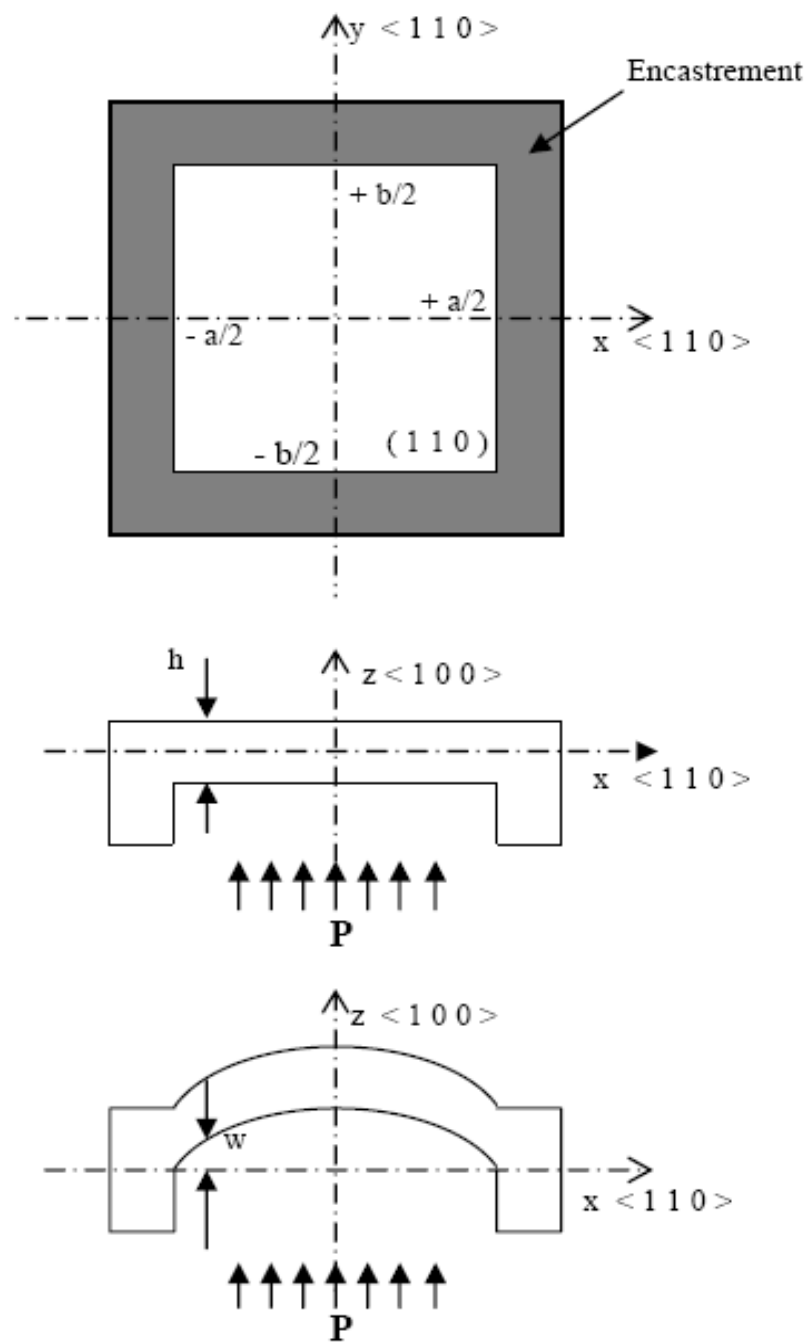


Figure 2.1 : Vue de dessus de la membrane rectangulaire.

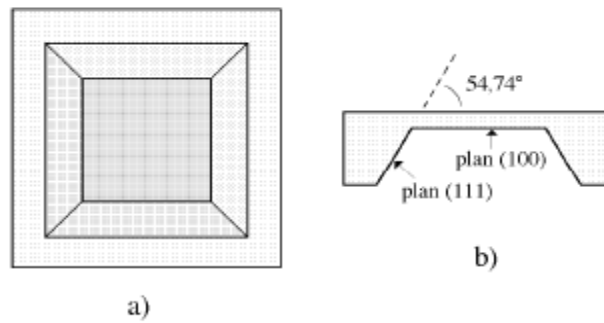


Fig (2.2) : schéma d'une membrane micro usinée vue coté gravé (a) et en coupe (b).

Conformément à la théorie des plaques élastiques minces et en tenant compte de l'anisotropie du silicium [8], le comportement de la membrane est décrit par l'équation différentielle (2.1)

$$\frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4} + 2\alpha \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial y^4} = \frac{P}{D} \dots\dots\dots (2.1)$$

Où

$W(x, y)$ représente les faibles déflexions, telle que $w \ll h$.

P est la pression uniforme et constante appliquée.

α si le coefficient d'anisotropie.

D le coefficient de rigidité du silicium

Avec α si le coefficient d'anisotropie et D le coefficient de rigidité du silicium, qui sont définies par [8]:

$$\alpha = \nu + 2 \frac{G}{E} (1 - \nu^2)$$

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

Où ν est le coefficient de Poisson, E le module de Young et G le module de Coulomb.

L'équation (2.1), c'est l'équation fondamentale de la déflexion mécanique d'une membrane fine au silicium monocristallin, soumise à une pression uniforme et constante, dans le cas des petites déformations.

Avec les conditions aux limites imposées par l'encastrement de la membrane à ses bords qui sont données par les équations suivantes [6,9] :

$$W(x = \pm a, \forall y) = 0 \quad (a)$$

$$W(\forall x, y = \pm b) = 0 \quad (b)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x}(x = \pm a, \forall y) = 0 \quad (c)$$

$$\frac{\partial w}{\partial x}(\forall x, y = \pm b) = 0 \quad (d)$$

Plusieurs solutions approchées ont été proposées, pour résoudre l'équation de Lagrange d'ordre 4 régissant la déformation d'une membrane de forme rectangulaire ou carrée, parfaitement encastree au bord, soumise à une pression constante et uniforme. Parmi elles la méthode de Galerkin En utilisant des fonctions de base appropriées polynomial.

La méthode de Galerkin est une méthode numérique bien connue pour résoudre les équations différentielles d'ordre supérieur.

l'expression de la déflexion $w(x, y)$ en tout point de la membrane. est donnée comme suit [10] :

$$w(x, y) = \left[1 - \left[\frac{2x}{a}\right]^2\right]^2 * \left[1 - \left[\frac{2y}{b}\right]^2\right]^2 * \left[\sum_{i,j}^n K_{i,j} \left[\frac{2x}{a}\right]^i * \left[\frac{2y}{b}\right]^j\right] \dots\dots\dots (2.2)$$

Les valeurs numérique des coefficients $K_{i,j}$ données dans le tableau suivant:

$K_{0,0}$	$K_{0,2}$	$K_{2,0}$	$K_{2,2}$	$K_{2,4}$	$K_{4,2}$	$K_{4,0}$	$K_{0,4}$	$K_{4,4}$
0.212687E-01	0.495919E-02	0.495919E-02	0.536361E-02	0.353054E-04	0.353055E-04	0.278091E-02	0.278091E-02	0.501282E-02

Tableau (2.1) : Valeurs numérique des coefficients $K_{i,j}$ figurants dans l'expression de la déflexion [6].

II.3-Détermination des Contraintes Normales ($\sigma_{xx}\sigma_{yy}$) et de Cisaillement σ_{xy} :

Les contraintes produisent des déformations des milieux auquel elles sont appliquées. La mesure des déformations en des zones judicieusement choisies permet donc de calculer les contraintes qui sont à leur origine. Lorsqu'un solide soumit à des contraintes, la loi de Hooke généralisée [1,2] s'écrit

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\ \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \\ \epsilon_z = \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_{xz} = G \left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right] \\ \gamma_{yz} = G \left[\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right] \\ \gamma_{yx} = G \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] \end{array} \right.$$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$: Déformation selon les différents axes

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$: Contraintes normales

$\gamma_{xz}, \gamma_{yz}, \gamma_{yx}$: Contraintes cisaillements

$W \ll h$ donc nous pouvons utiliser les approximations suivantes :

$$\sigma_z \ll \sigma_x \text{ et } \sigma_z \ll \sigma_y$$

$$\gamma_{xz} \ll \gamma_{yz} \text{ et } \gamma_{xz} \ll \gamma_{yx}$$

Alors le système d'équation (II.) devient :

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = -z \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu \sigma_y] \\ \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} = -z \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu \sigma_x] \\ \varepsilon_z = G \left[\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right] = -2Gz \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \end{cases}$$

Exprimons maintenant les contraintes en fonction de la déformation $W(x,y)$ nous aurons :

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left[\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] \\ \sigma_y = -\frac{Ez}{1-\nu^2} \left[\nu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] \\ \sigma_z = -Gz \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \end{cases} \dots\dots\dots(2.3)$$

D'après la théorie d'élasticité [1,2] les expressions des contraintes engendrées sur la membrane soumise à la pression constante et uniforme P . sont données par l'équation (2-4), sur la surface de la membrane c'est-à-dire pour $h = z/2$ ces expressions deviennent :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{xx} = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left[\frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] \\ \sigma_{yy} = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left[\nu \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} \right] \\ \sigma_{yx} = G h \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \end{array} \right. \dots\dots\dots(2.4)$$

$$\sigma_{xx} = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left[(1-(y/b)^2)^2 \cdot [-4/a^2 + 12x^2/a^4] \cdot \left[\sum_{i,j}^n K_{i,j} \cdot i(i-1) (x/a)^{(i-2)} (y/b)^j \nu [1-(x/a)^2]^2 \cdot \right. \right. \\ \left. \left. [-4/b^2 + 12y^2/a^4] \cdot \left[\sum_{i,j}^n K_{i,j} \cdot j(j-1) (y/b)^{(j-2)} (x/b)^i \right] \right. \right]$$

$$\sigma_{yy} = \frac{Eh}{2(1-\nu^2)} \left(\nu [1-(y/b)^2]^2 \cdot [-4/a^2 + 12x^2/a^4] \cdot \left[\sum_{i,j}^n K_{i,j} \cdot i(i-1) (x/a)^{(i-2)} (y/b)^j + \right. \right. \\ \left. \left. [1-(x/a)^2]^2 \cdot [-4/b^2 + 12y^2/a^4] \cdot \left[\sum_{i,j}^n K_{i,j} \cdot j(j-1) (y/b)^{(j-2)} (x/b)^i \right] \right. \right)$$

$$\sigma_{xx} = [12(x/a)^2 - (4/a)] + (y/b)^4 [12(x/a)^2 - (4/a)] - 2[12(x/a)^2 - (4/a)][1-(y/b)^2]^2 [(i-1) \cdot i(x/a) (x/a)^{(i-2)}] (y/b) (y/b)^j + [1-(x/a)^2]^2 + 12(y/b)^2 [1-(x/a)^2]^2 - [1-(x/a)^2]^2 [12(y/b)^3 - 4/a] [(x/a)^i j(j-1)(y/b)^{(j-2)}]$$

II.4-Résultats et discussion

II.4.1- Membrane Carrée

L'expression des modules d'Young E de Coulomb G et le coefficient de poisson du silicium utilisées dans notre modalisation sont celles définies dans le cas particulier d'un plan(100) et de la direction (110) tel que établir par [9,5] et leur valeurs sont données par : $E_{110}=0.16892\text{GPa}$

$$G_{110}=0.05092\text{GPa}$$

$$\nu_{110}=0.22$$

Les dimensions de la membrane sont celles utilisées par [9,5] :

$$a=1897 \mu\text{m}$$

$$b=1897 \mu\text{m}$$

$$h=30 \mu\text{m}$$

A partir de ces expressions nous pouvons tracer les courbes de variations de déformation $w(x,y)$, des contraintes normales et des contraintes de cisaillement, représentées sur les figures (2-3) (2-4) (2-5).

Les Figures montrant bien que ces dernières sont nulles au centre de la membrane mais qu'elles sont maximales au milieu du bord de celle-ci. On constate par contre que la variation des contraintes est assez abrupte aux bords de la membrane. Donc il faudra en tenir compte lors du positionnement des jauges de contraintes dans la conception des capteurs de pression piézorésistif.

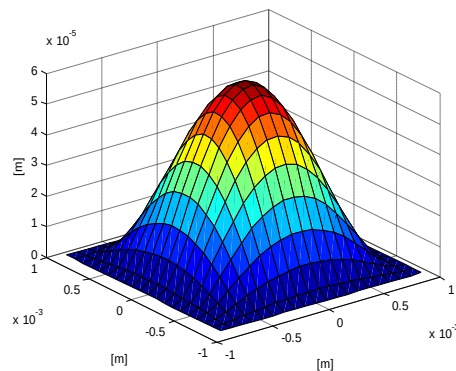


Fig (2.2) Déformation $w(x, y)$

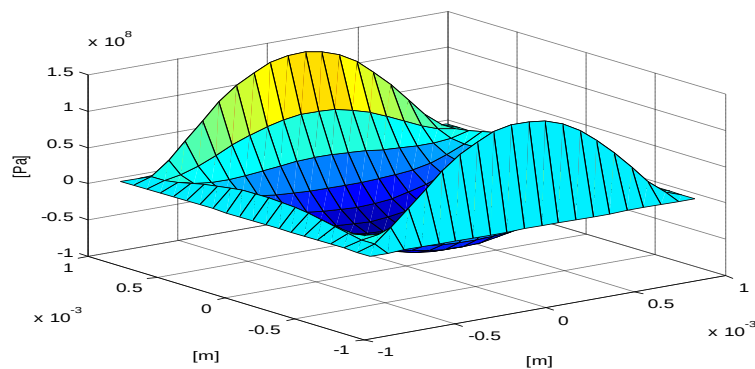
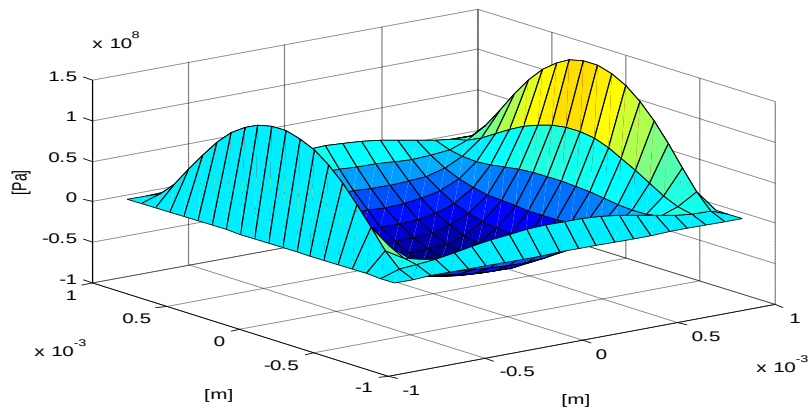
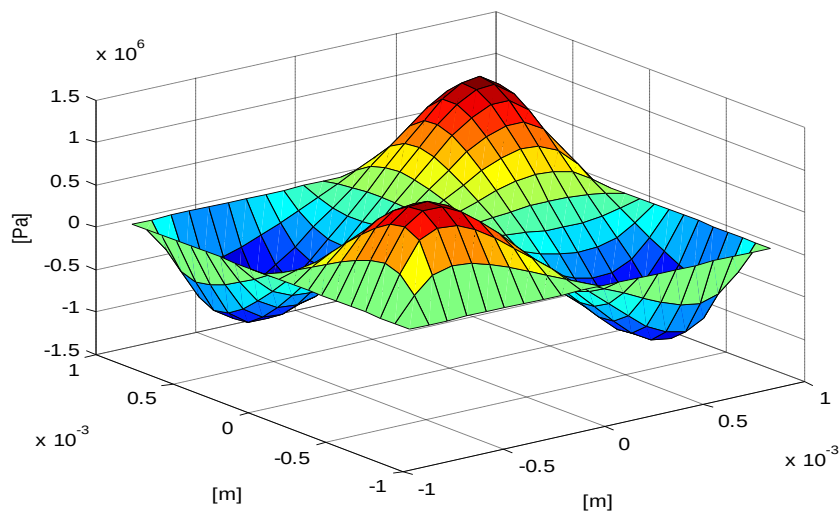


Figure (2.3) Courbes de variation des contraintes normales σ_{xx}

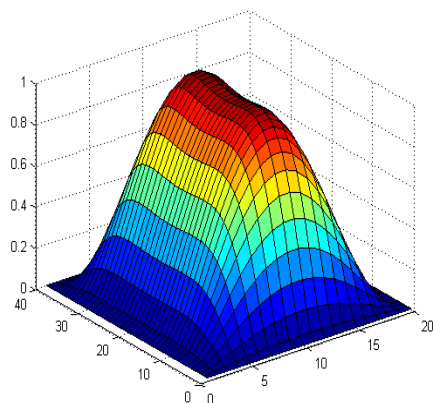
Fig (2.4) Courbes de variation des Contraintes normales σ_{yy} Fig (2.5) Courbes de variation des Contraintes de cisaillement σ_{xy}

II.4.2- Etude d'une membrane rectangulaire

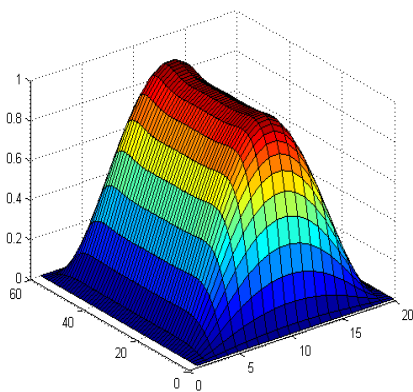
En utilisant les différentes valeurs du rapport de dimension r_d (a/b) égaux $[0.5, 0.33, 2]$, nous représentons sur les figures (2.6) les courbes de variation de la déformation normalisée $[w(x,y)/w_0]$ ainsi que celles des contraintes normales σ_{xx} , σ_{yy} sur les figures (2.7) (2.8) et de cisaillement σ_{xy} sur les figures (2.9) pour diverses valeurs du rapport de dimension r_d , ainsi on a résumé le résultat dans la tableau II.1

r_d	$r_d=0.33$	$r_d=0.5$	$r_d=1$	$r_d=2$
W_0	$6.5305 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$1.0964 \cdot 10^{-4}$
σ_{xx} (pa)	$1.5064 \cdot 10^8$	$1.3557 \cdot 10^9$	$1.2771 \cdot 10^9$	$3.0698 \cdot 10^8$
σ_{yy} (pa)	$1.4032 \cdot 10^8$	$1.2629 \cdot 10^9$	$1.3028 \cdot 10^9$	$3.4795 \cdot 10^8$
σ_{xy} (pa)	$1.0997 \cdot 10^6$	$9.8969 \cdot 10^6$	$1.0184 \cdot 10^7$	$2.4566 \cdot 10^6$

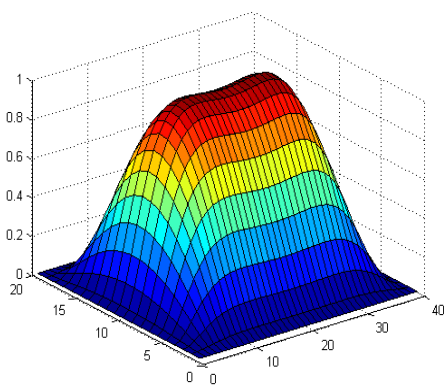
Tableau(2.2) : les différentes valeurs des déformations et des contraintes pour diverses valeurs du rapport de dimension r_d



$$r_d = 0.3$$

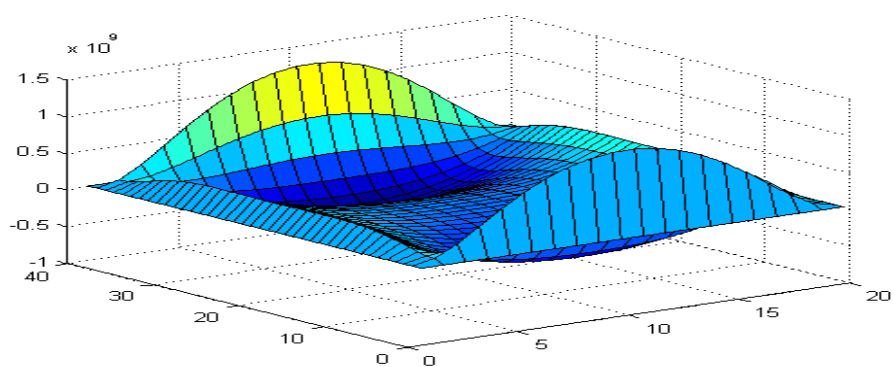


$$r_d = 0.5$$

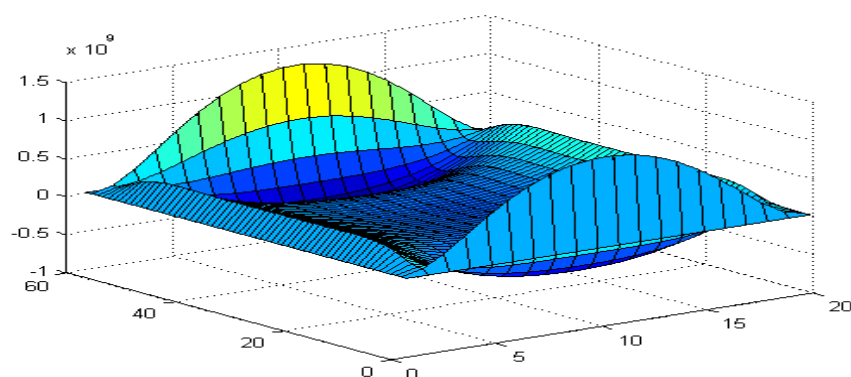


$$r_d = 2$$

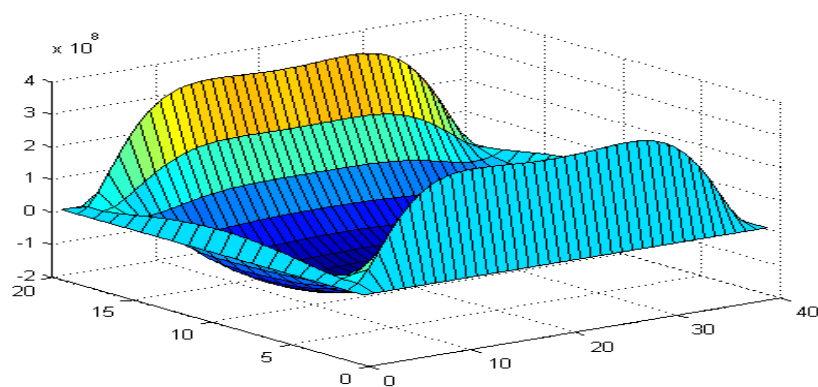
Fig (2.6) courbes de déformation normalisée $[w(x,y)/w_0]$ pour diverses valeurs de r_d



$$r_d = 0.5$$

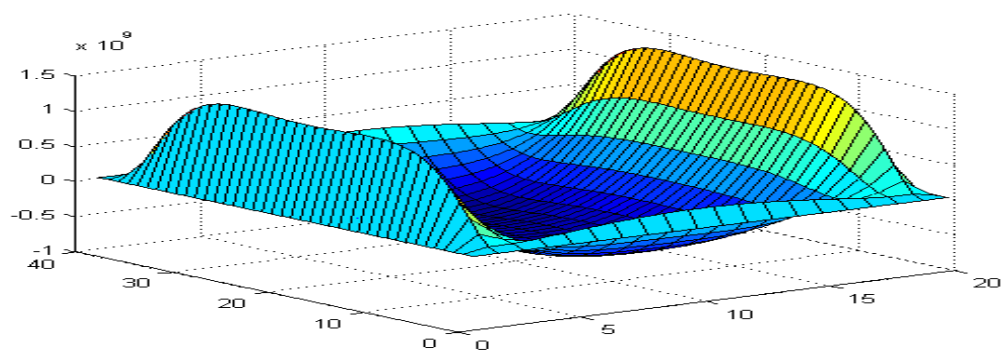


$$r_d = 0.33$$

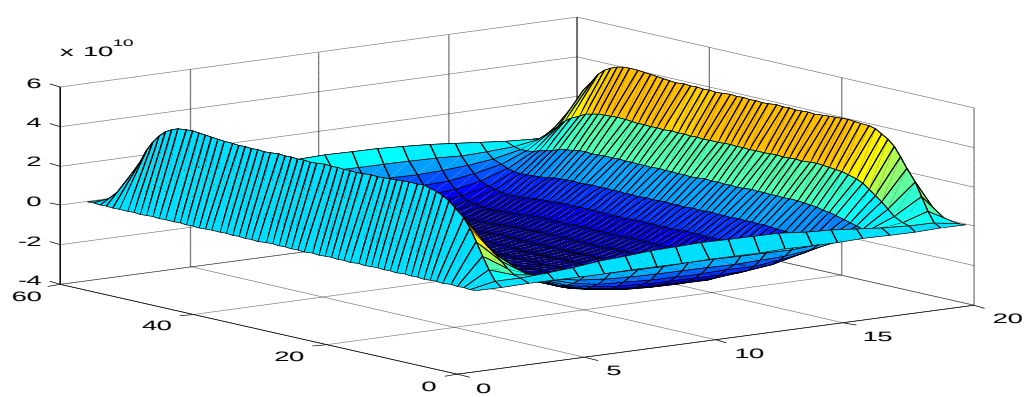


$$r_d = 2$$

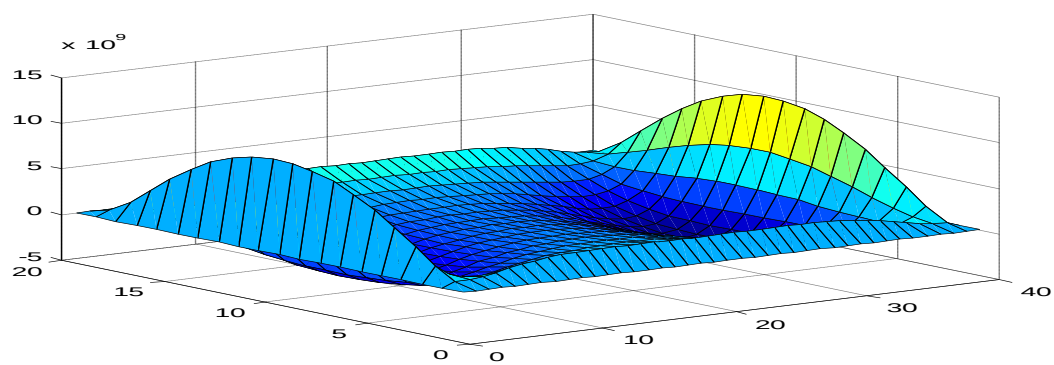
Fig (2.6) courbes de contraintes normales σ_{xx} pour diverses valeurs de r_d



$$r_d = 0.5$$

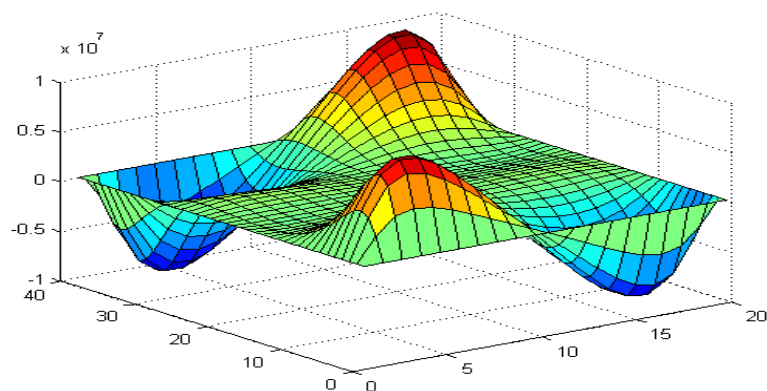


$$r_d = 2$$

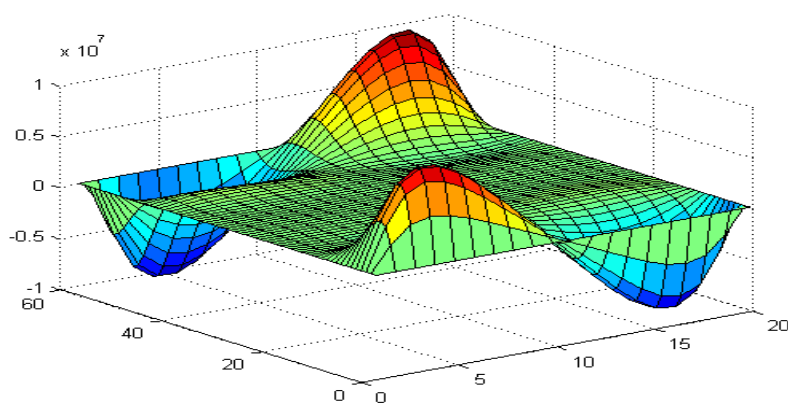


$$r_d = 0.33$$

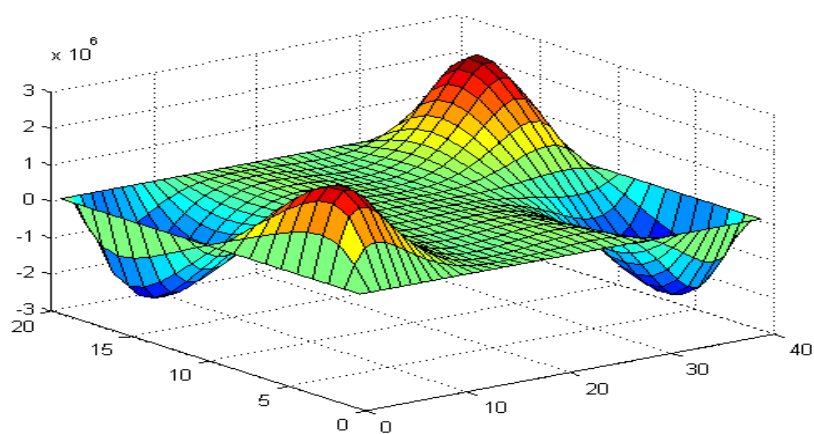
Fig (2.7) courbes de contraintes normales σ_{yy} pour diverses valeurs de r_d



$$r_d = 0.5$$



$$r_d = 2$$



$$r_d = 0.3$$

Fig (2.8) courbes de contraintes cisaillement σ_{xy} pour diverses valeurs de r_d

A partir des courbes contraintes normales σ_{xx}, σ_{yy} nous avons relevé les valeurs de ces dernières en des points particuliers tout le long des bords de la membrane. Ce la nous a permis de constater que les déformations sont maximales au centre de membrane, alors que les contraintes sont maximales au milieu du bord de la membrane.

On effet on voit bien que pour une membrane rectangulaire la valeur de la déformation au centre de la membrane est plus importante, ainsi que les valeurs des contraintes normales σ_{xx} et σ_{yy} qu'elles sont à leur valeurs optimales au milieu du bord de la membrane. Nous constatons aussi que la valeur de cet extremum est proportionnelle à la valeur de r_d , et qu'il augmente avec la valeur de r_d jusqu'à la valeur 2.

L'étude des déformations et contraintes en fonction du rapport de dimension r_d montre que la déflexion est plus importante pour $r_d = 0.5$. On peut conclure qu'une membrane rectangulaire ($r_d = 0.5$) supporte plus élevée et fléchit plus que celle de forme carrée.

II.5-Conclusion :

Le système d'équations différentielles régissant la déflexion d'une membrane a été résolu par la méthode de Galerkin pour des membranes de géométrie carrée, rectangulaire.

Nous avons effectué la détermination des expressions de la déflexion de la membrane et des contraintes en tous points, ce qui nous a permis de localiser les points les plus contraints de la membrane qui deviendront les positions optimales des jauges de contraintes sur la membrane, pour réaliser des micros capteurs de pression piézorésistif performants. L'étude des déformations et contraintes en fonction du rapport de dimension r_d montre que la déflexion est meilleur pour $r_d = 0.5$. On peut conclure qu'une membrane rectangulaire supporte plus élevée et fléchit plus que celle de forme carrée.

CHAPITRE III

MODELISATION ET CONCEPTION DU CAPTEUR DE PRESSION

III.1-Introduction :

Et tant que la résistivité est un paramètre électrique très important d'un matériau semi –conducteur nous étudions ce paramètre à basse température et à température élevée puis sa variation en fonction du dopage. Nous baserons notre travail sur quatre modèles de la résistivité : **KLAASEN**, **DORCKEL**, **ARORA** et **MASETTI**.

Ensuite, nous allons appliquer les résultats obtenus de la déformation mécanique d'une membrane de forme carrée, rectangulaire à un capteur de pression piezoresistif, ainsi nous développerons une étude sur le capteur de pression piezoresistif.

III.2-Etude des Paramètres Physico électrique des Jauges :

III.2.1 Etude du Comportement Thermique de la Mobilité :

III.2.1.1 Généralités sur les paramètres physiques de la mobilité:

a-Mobilité :

La mobilité est définie comme le déplacement des électrons (μ_n) ou des trous (μ_p) dans un réseau cristallin. Les électrons sont plus mobiles que les trous (par un facteur de 1.7 à 2.8) [11] à cause de leur masse effective plus faible.

Le tableau (3.1), donne des valeurs typiques de μ_n et μ_p à température ambiante

μ (cm ² .V.s-1)	Si pur	Si fortement dopé
Electrons libres	1350	100
Trous	480	60

Tableau (3.1) : Mobilité des électrons et des trous dans divers semi-conducteurs

b-Résistivité :

Dans un semi-conducteur non dopé, la résistivité ρ est définie le caractère intrinsèque du matériau.

Elle varie de $1.7 \times 10^{18} \Omega m$ pour un très bon conducteur (cuivre), à $10^{16} \Omega m$ pour un bon isolant (quartz fondu) à la température ambiante. La résistivité électrique est liée avec la mobilité des porteurs par la relation :

$$\frac{1}{\rho} = q(n\mu_n + p\mu_p) \dots\dots\dots (3.1)$$

n et p leurs densités respectives.

c-Résistance :

Le courant électrique dans un fil conducteur consiste en l'écoulement de charges électriques. Par convention, le sens du courant est le sens de déplacement de charges positives. L'intensité **I** du courant électrique est définie comme la charge électrique passant par unité de temps à travers une section du fil.

Le potentiel électrique U en un point est, par définition, l'énergie potentielle électrique d'une charge unitaire en ce point.

Une des premières découvertes expérimentales sur le courant électrique dans les fils Conducteurs fut la loi d'Ohm : $\Delta U = RI$

Où ΔU est la différence de potentiel entre les extrémités du fil ou R est la résistance du fil.

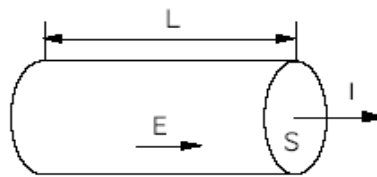


Fig. (3.1) : Élément de conducteur de section S et de longueur L.

La résistance d'un barreau semi- conducteur piézoélectrique rectangulaire est en fonction de sa longueur L et de sa section S selon la formule suivante:

$$R(T) = \rho(T) \times \frac{L}{S} = \rho(T) \times \frac{L^2}{V} \dots\dots\dots (3.2)$$

Où :

R : Résistance du conducteur (Ω) ;

ρ : Résistivité du matériau ($\Omega.m$) ;

L : Longueur du conducteur (m) ;

S : Section du conducteur (m^2) ;

V : Volume (m^3).

Pour une jauge de type P, l'équation (3.1) devient :

$$\frac{1}{\rho(T)} = q\mu_p(T)N_A \dots\dots\dots (3.3)$$

Où q est la charge élémentaire.

$\mu_p(T)$: La mobilité des trous (porteurs majoritaires)

N_A : La concentration des dopants.

III.2.1.2- Modèles de Mobilité :

La mobilité dépend du dopage et de la température, il est évident que R en dépend également. La forme de cette dépendance est liée au modèle utilisé pour rendre compte des phénomènes physico-électriques existant dans un cristal semi-conducteur. Les modèles utilisés dans ce travail sont ceux dits de **KLAASSEN**[12], de **DORCKEL**[13], **D'ARORA**[14], et de **MASETTI** [15].

Ces quatre modèles de mobilité présentent un ensemble d'équations mathématiques, qui définies sa variation électrique en fonction de la température et le dopage .

Comme il existe une relation directe entre la mobilité et la résistivité, cette dernière nous permet de faire un développement analytique et par le billet d'un outil informatique, la résistivité a été présente facilement sous la forme d'une seule équation varie uniquement en fonction de deux paramètres électriques qui sont la température et le dopage, nous présentons la variation de résistivité par les quatre modèles comme suit:

A-Modèle de KLAASSEN :

$$\rho_p = \frac{1}{N_A} \left(6.25 \times 10^{18} \left(\frac{5.772300248 \times 10^{-9}}{\left(\frac{1}{T}\right)^{2.247}} + \frac{1}{3.648212847 \times 10^{13} T^{0.657} \left(\frac{1}{N_A}\right)^{0.719} + 859.7357317 \left(\frac{1}{T}\right)^{0.5}} \right) \right) \dots (3.4)$$

B-Modèle de DORCKEL :

$$\rho_p = \frac{4.48340588 \times 10^{10} T^{2.2}}{N_A \left(\frac{1.025}{1 + 4.809543704 \times 10^{-12} \left(\frac{1}{T^{5.2}} \left(\frac{1 \times 10^{17} T^{1.5}}{(A-B)N_A + \frac{2 \times 10^{17} T^{1.5}}{\ln(1 + 178.3871923 T^2)}} \right) (A-B)N_A \ln(1 + 178.3871923 T^2) \right) \right)^{0.715}} \right)^{-0.025}} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

Avec:

$$A = \ln \left(1 + \frac{6.25 \times 10^{14} T^2}{N_A} \right) ;$$

$$B = \frac{6.25 \times 10^{14} T^2}{N_A + 6.25 \times 10^{14} T^2} .$$

C-Modèle d'ARORA :

$$\rho_p = \frac{6.25 \times 10^{18}}{N \left(T_c + \frac{1.36 \times 10^{18}}{T^{2.23} \left(1 + \frac{7.588667500 \times 10^{-12} \times N}{T^{2.546}} \right)} \right)} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

D-Modèle MASETTI :

$$\rho_p = \frac{0.625 \times 10^{19}}{N \left(44.9 \exp \left(-\frac{0.923 \times 10^{17}}{N} \right) + \frac{0.1325032066 \times 10^9}{T^{2.2} \left(1 + 0.3361776241 \times 10^{-12} N^{0.719} \right)} - \frac{29}{1 + 0.372100 \times 10^{42} \left(\frac{1}{N} \right)^{2.0}} \right)} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

III.2. 3- Variation de la Résistivité en Fonction du Dopage:

Nous avons tracé la variation de la résistivité pour les modèles **KLASSEN**, **DORCKEL**, **ARORA** et **MASETTI**, en fonction du dopage pour une gamme de température de 300°K à 450°K.

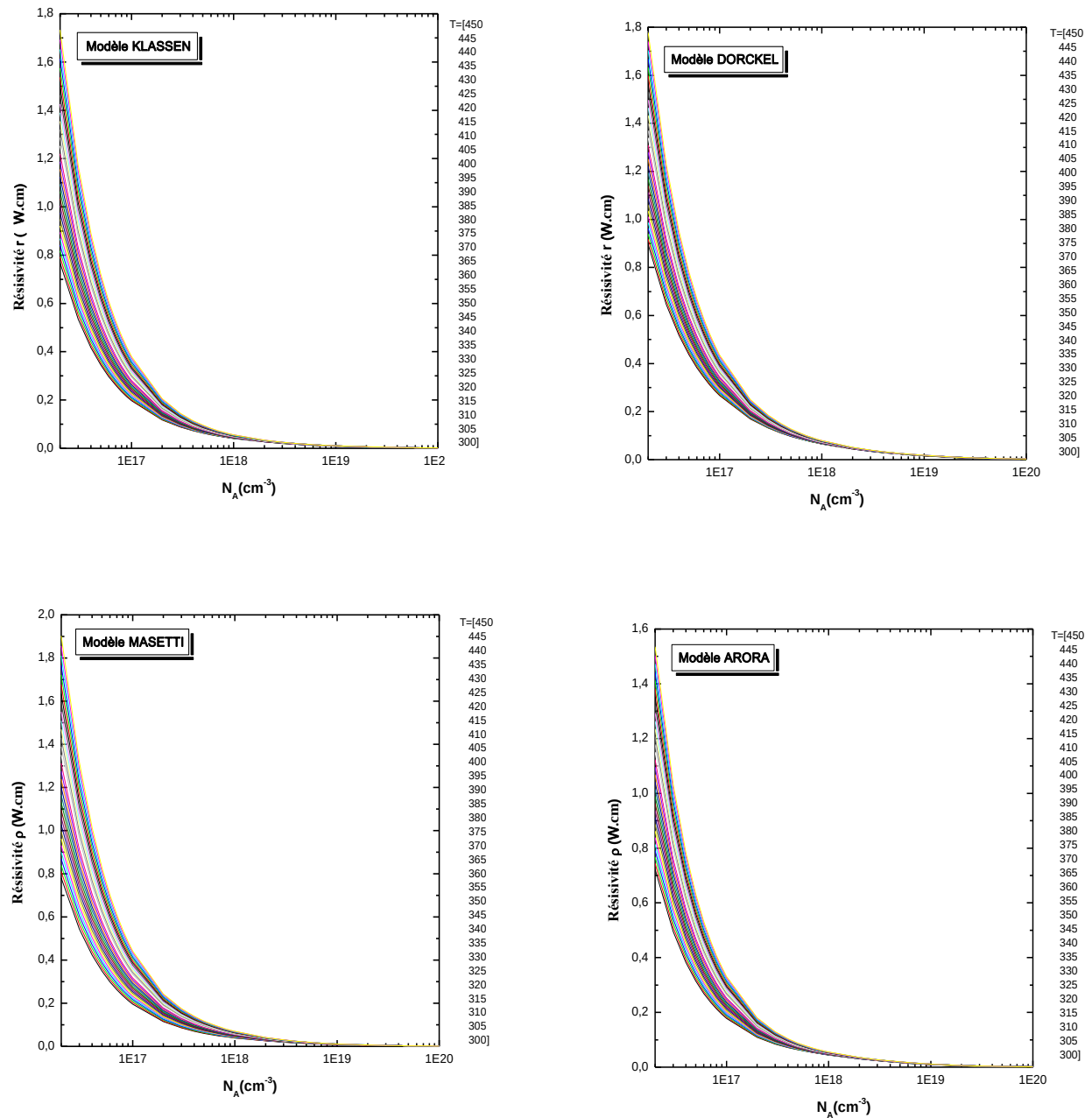


Fig. (3.2) : Variation de la résistivité du silicium en fonction de dopage (type P) pour les modèles : **KLASSEN**, **DORCKEL**, **ARORA** et **MASETTI**.

La figure (3.2), montre pour les quatre modèles adaptés une décroissance rapide de la résistivité en fonction du dopage et plus que la température augmente plus que sa valeur augmente.

III.2.4- Variation de la Résistivité en Fonction de la Température :

La figure (3.3) illustre la variation de la résistivité pour les quatre modèles en fonction de la température.

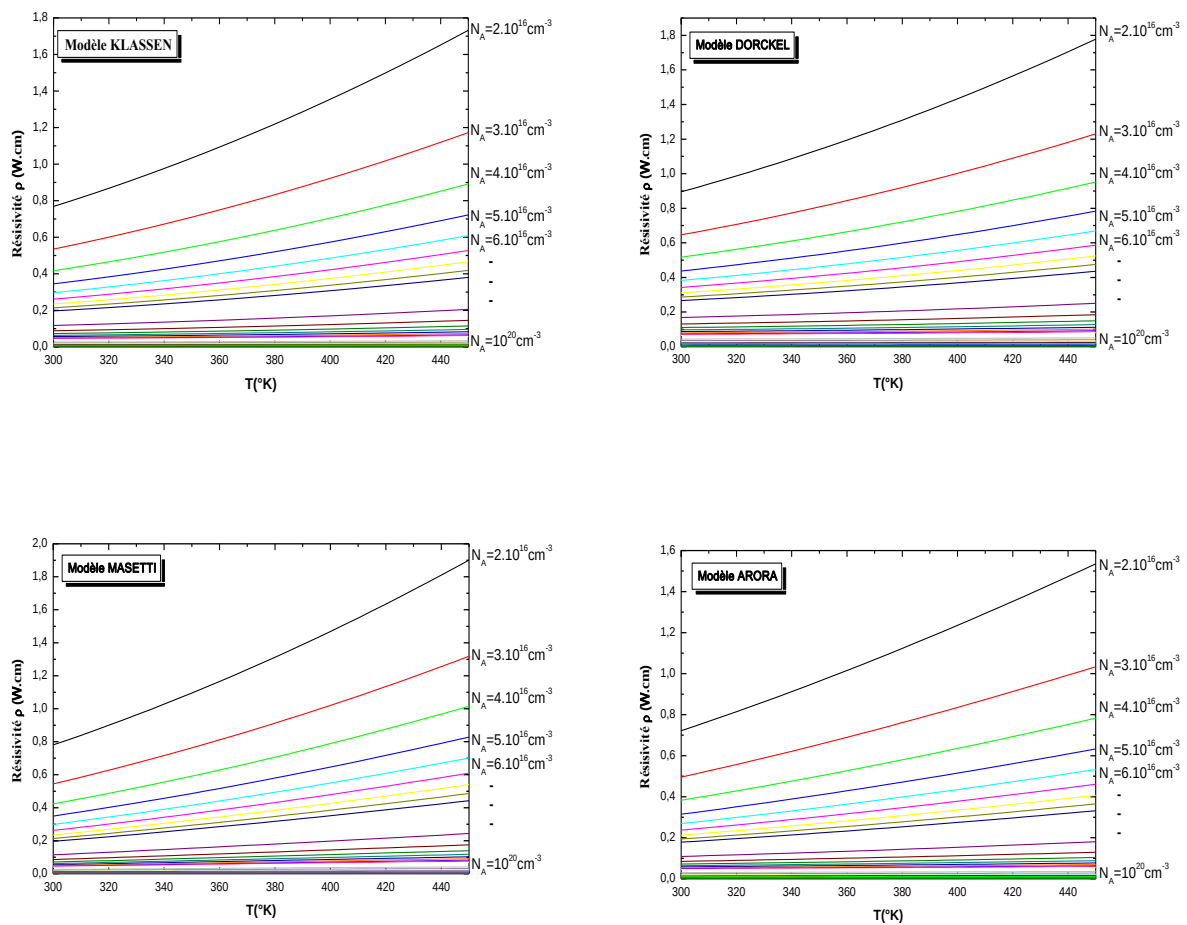


Fig. (3.3) : Variation de la résistivité du silicium en fonction de la température Pour les modèles : KLASSEN, DORCKEL, ARORA et MASETTI a différents dopages (type P).

Dans cette gamme de température et pour des fortes concentrations des dopants la résistivité présente une variation presque constante, sa valeur augmente pour les faibles concentrations. L'allure des quatre courbes est presque la même,

III.3- Description du capteur de pression piézorésistif :

La plupart des capteurs de pression piézorésistifs sont réalisés par micro usinage du silicium par un agent chimique anisotropique (en général KOH dilué et chaud). La structure obtenue est souvent collée par une soudure électrostatique à un support en verre. Les diaphragmes qui portent les piézorésistances ont une épaisseur de quelques micromètres et une surface de quelques millimètres carrés. [1]

Le schéma de principe de ce dernier montre qu'il est composé de trois éléments essentiels (voir figure (3.4)) [1,2] :

- la membrane qui constitue le corps d'épreuve qui transforme la pression en une déformation mécanique
- des jauges semi conductrices qui assurent la transduction de cette déformation en résistance.
- Le circuit de conditionnement constitué par la connexion de ces quatre jauges en pont de Wheatstone qui délivre à sa sortie une tension électrique.

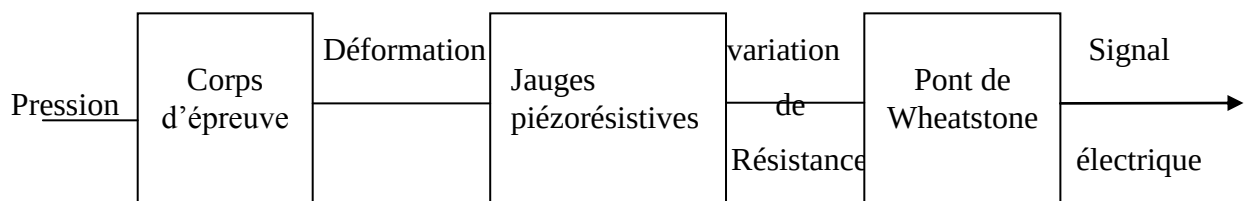


Figure (3.4) : Schéma de principe d'un capteur de pression piézorésistif

III.3.1.Choix du matériau :

Le matériau qui constitue le corps d'épreuve est réputé avoir un comportement linéaire, tout au moins dans le domaine nominal d'emploi. Son choix est naturellement dicté par le système de détection mais, surtout, largement induit par le procédé de

fabrication et leur coût de revient [5]. Les alliages d'aluminium, les aciers inoxydables, les céramiques, le silicium et ses dérivées entrent dans la composition du plus grand nombre des corps d'épreuves.

	Module de Young (E) (Pa)	Coefficient de poissant (ν)	Module de coulomb (G) (Pa)	W_{max}	$\sigma_{xx\ max}$ (Pa)	$\sigma_{yy\ max}$ (pa)	$\sigma_{xy\ max}$ (pa)
Si	$1.6 \cdot 10^{11}$	0.22	$0.5092 \cdot 10^{11}$	$6.20 \cdot 10^{-6}$	$1.4192 \cdot 10^8$	$1.447 \cdot 10^8$	$1.1947 \cdot 10^7$
Poly Si	$1.6 \cdot 10^{11}$	0.226	$0.66 \cdot 10^{11}$	$6.188 \cdot 10^{-6}$	$1.419 \cdot 10^8$	$1.447 \cdot 10^8$	$1.544 \cdot 10^8$
Si O₂	$7 \cdot 10^{10}$	0.3	$0.35 \cdot 10^{11}$	$1.356 \cdot 10^{-5}$	$1.4172 \cdot 10^8$	$1.4457 \cdot 10^8$	$1.794 \cdot 10^8$
Si₃N₄	$3.8 \cdot 10^{11}$	0.27	$1.25 \cdot 10^{11}$	$2.545 \cdot 10^{-5}$	$1.4182 \cdot 10^8$	$1.4466 \cdot 10^8$	$1.203 \cdot 10^8$

Tableau (3.2) : valeur de E, ν , G, W et les contraintes dans les différents matériaux

Nous avons constatés que les deux métaux Si et Poly Si qui ont le même module de Young, le comportement mécanique d'une fine membrane de silicium ou poly silicium est plus important que pour les autres

III. 3.2- propriétés du silicium monocristallin :

Le monocristal de silicium est le semi-conducteur le plus utilisé à l'heure actuelle pour la fabrication de dispositifs électroniques à base de transistors MOS ou bipolaires.

Ces propriétés mécaniques associées aux possibilités d'usinage chimique isotropique ou anisotropique (suivant certaines directions cristallines) ont conduit, depuis quelques années (1970), à la réalisation de capteurs exploitant les propriétés élastiques du cristal de silicium.

Outre ces caractères mécaniques, la forte piézorésistivité du silicium constitue une

motivation supplémentaire pour le développement et la commercialisation de capteurs de pression et d'accélération depuis quelques années (1975). Ainsi une simple diffusion d'impuretés définissant un pont de jauge permet d'associer au corps d'épreuve un détecteur de déformations.

III.3. 3- Principe de piézorésistivité dans le silicium monocristallin :

L'effet piézorésistif représente la variation de résistivité d'un corps soumise à une variation de contraintes mécanique, cet effet est très important dans le silicium, d'après la théorie de l'élasticité et compte tenu des symétries présentes dans le cristal, les relations des contraintes σ et des déformations ε peuvent être représentées par la loi de Hooke [9] s'écrit :

$$\varepsilon_{ij} = \sum_{k,l} S_{ijkl} \sigma_{kl}$$

ε_{ij} : Tenseur de déformation

S_{ijkl} : Tenseur d'élasticité du matériau

σ_{kl} : Tenseur des contraintes

Avec les C_{ij} coefficients des matrices de rigidité sachant que ε_{ij} et σ_{kl} sont des tenseur symétriques d'ordre 2, le tenseur S_{ijkl} de rang 4.

En utilisant la règle de contrainte : $\varepsilon_i = \sum_{j=1}^6 S_{ij} \sigma_j$

$$\varepsilon_1 = S_{11}\sigma_1 + S_{12}\sigma_2$$

$$\varepsilon_2 = S_{12}\sigma_1 + S_{11}\sigma_2$$

$$\varepsilon_6 = S_{44}\sigma_6$$

$$\sigma_1 = C_{11}\varepsilon_1 + C_{12}\varepsilon_2$$

$$\sigma_2 = C_{12}\varepsilon_1 + C_{11}\varepsilon_2$$

$$\sigma_6 = C_{44}\varepsilon_6$$

En appliquant le même principe de contraction d'indice et utilisant la symétrie du cristal nous obtenons la matrice des coefficients de piézorésistivité π_{ij} en fonction de trois composantes indépendantes ($\pi_{11}, \pi_{12}, \pi_{44}$).

Les coefficients fondamentaux de piézorésistivité établit par Smith [5] sont résumés dans le tableau II-1

Silicium	Résistivité	$\pi_{11} 10^{-11} \text{Pa}^{-1}$	$\pi_{12} 10^{-11} \text{Pa}^{-1}$	$\pi_{44} 10^{-11} \text{Pa}^{-1}$
Type N	11.7	-102.2	53.4	-13.6
Type P	7.8	6.6	-1.1	138.1

Tableau (3.3) Les coefficients fondamentaux de piézorésistivité pour le silicium de type N et type P

➤ **Expression de la variation de résistance :**

On considère une jauge rectangulaire, sous l'influence d'un champ électrique appliqué parallèlement à sa longueur et soumise à une pression. La variation relative de la résistance d'après l'expression (1.1)

Nous rappelons que les contraintes longitudinales σ_l et transversales σ_t obtenues sont proportionnelles à la pression appliquée P

$$\sigma_l = \sigma_{\max 1} * \left(\frac{a}{h}\right)^2 * P = \sigma_{xx}(x=0, y=\pm b) \dots\dots\dots (3.8)$$

$$\sigma_t = \sigma_{\max 2} * \left(\frac{a}{h}\right)^2 * P = \sigma_{yy}(x=0, y=\pm b) \dots\dots\dots (3.9)$$

$$\sigma_l = 1.4466 * \left(\frac{a}{h}\right)^2 * P \dots\dots\dots (3.10)$$

$$\sigma_t = 1.4182 * \left(\frac{a}{h}\right)^2 * P \dots\dots\dots (3.11)$$

Sachant que la réponse des jauges à une pression uniforme est caractérisée par la variation de leur résistivité, que l'on peut définir par une variation des piézorésistance

$$\frac{\Delta R}{R}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t + \pi_c \sigma_c \dots\dots\dots (3.12)$$

D'après les valeurs des coefficients $\pi_{11}, \pi_{12}, \pi_{44}$ pour un semi conducteur type P nous pouvons calculer les valeurs approchées des coefficients π_l, π_t, π_c

$$\pi_l = \frac{\pi_{44}}{2}$$

$$\pi_l = -\pi_{44}/2$$

$$\pi_c = 0$$

Dans le cas où les piézorésistances sont appareillées deux à deux toute étant réparties dans leurs positions optimales sur la membrane, on en déduit les expressions simplifiées des piézorésistances longitudinales $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\parallel}$ et transversales $\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\perp}$ des jauges

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\parallel} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t = \pi_{44}(\sigma_l - \sigma_t)/2 \quad (3.13)$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{\perp} = \pi_l \sigma_t + \pi_t \sigma_l = -\pi_{44}(\sigma_l - \sigma_t)/2 \quad (3.14)$$

III.3.4. Facteur de jauge :

Le facteur de jauge est la grandeur usuellement utilisée pour caractériser les jauges, définissant ainsi performance. Elle est donnée par la relation suivante :

$$K = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\Delta R}{R_0} \quad (3.15)$$

$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ Représente la déformation unie axial.

Dans le cas de notre étude, la déformation est effectuée selon deux directions ce qui conduit à avoir deux composantes de déformation l'une dans la direction longitudinale $\varepsilon_{\parallel}$ et l'autre transversale $\varepsilon_{\perp}$.

$$\frac{\Delta R}{R_0} = K_{\parallel} \varepsilon_{\parallel} + K_{\perp} \varepsilon_{\perp}$$

Avec : $K_{\parallel} = \frac{1}{\varepsilon_{\parallel}} \frac{\Delta R}{R_0}$ qui représente le facteur de jauge longitudinal

$K_{\perp} = \frac{1}{\varepsilon_{\perp}} \frac{\Delta R}{R_0}$ le facteur de jauge transversal

Le tableau (3.3) donne des valeurs typiques des facteurs de jauge.

Matériau	Facteur de jauge
Acier	2
Constantan (nickel chrome)	2.1
Semi conducteurs (silicium)	100 à 200

Tableau (3.3): Facteur de jauge pour différents matériaux [1]

III.4- Disposition des jauges sur la membrane :

Au centre du bord de la membrane, les contraintes changent de signe de part et d'autre, donc sur les cotés de la longueur et au centre, on disposera deux jauges longitudinalement à la membrane, Les deux autres jauges seront placées perpendiculairement à la membrane. Ainsi cette configuration permettra aux jauges de

détecter des contraintes optimales. Afin d'éviter la non linéarité de la réponse on s'éloigne de 15% du bord de la largeur de la membrane, car d'après ces courbes on voit bien des variations brusques des contraintes dans cette zone (100).

Pour une meilleur approximation et pour se rapprocher plus de la réalité, il ne faut pas considérer les contraintes constantes le long des jauges (elles ne peuvent plus être assimilées à des points) mais il faut calculer leur valeur moyenne le long des jauges.

A la surface d'une membrane de forme carrée ou rectangulaire, en Silicium de plan(100) [2]. Quatre piézorésistances identiques au Silicium de valeur au repos R_0 sont implantées et leurs côtés sont orientés selon la direction (110) [1,2,3]. Ces jauges sont montées en pont de Wheatstone, afin d'assurer les meilleures performances du dispositif voir figure (3.5). Nous appliquons une tension de polarisation V_i entre les points 1 et 2 et nous prélevons la tension de sortie V_o aux points 3 et 4

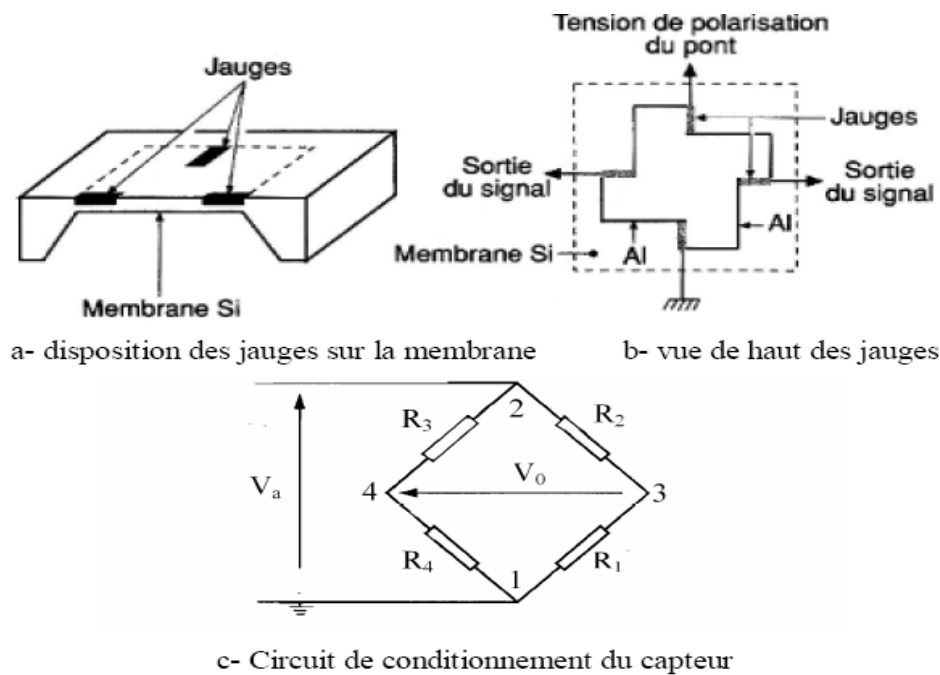


Figure (3.5) : Représentation des jauges sur la membrane d'un capteur de pression piézo-resistif

III.5- Principe de fonctionnement du pont :

La méthode la plus courante de mesure de déformation se fait par le changement de résistance électrique, ce que les matériaux présentent sous charge. La sortie d'une jauge de contraintes piézorésistives est une modification de la résistance, ΔR . Un pont de Wheatstone est généralement utilisé pour détecter les petits changements de forme de résistance que la sortie d'une jauge de mesure de circuit.

Dans de nombreuses applications, les conditions de chargement sont souhaitées dans le cadre des deux mesures de contrainte statique et dynamique. Un montage en pont de Wheatstone en circuit ou dans un autre circuit en pont, est le moyen le plus souvent utilisé pour mesurer les changements associés à la résistance statique et dynamique des charges des jauges de contraintes. Une analyse fondamentale des jauges piézorésistives de contraintes montées dans un pont permet de déterminer la relation entre l'apport de contraintes et de la tension de sortie du pont.

Considérons le cas où les quatre résistances, R_1 à R_4 représentent les branches du pont, sont identiques dont la valeur de résistance au repos est égale à R_0 . Soient V_i la tension d'entrée, V_0 la tension de sortie. En utilisant le théorème de superposition on peut facilement trouver la relation donnant la tension de sortie V_0 du pont en fonction de la tension d'alimentation V_i qui est donnée :

$$V_0 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) V_i \dots\dots\dots (3.16)$$

L'avantage principal du montage en pont de Wheatstone est qu'à l'équilibre, et si les résistances sont identiques, nous aurons une tension nulle en sortie, si la condition suivante :

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \dots\dots\dots (3.17)$$

Si on considère le cas plus générale ou les quatre résistances du pont varient simultanément autour de leur valeur d'équilibre mais de valeur très faible autour de leur résistance nominale R_0 .et elles sont différents les unes des autres par leurs accroissements respectifs $\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4$

La tension de sortie est donnée par :

$$\Delta V_0 = \frac{R_0(\Delta R_2 - \Delta R_1 + \Delta R_3 - \Delta R_4) + \Delta R_2 \Delta R_3 - \Delta R_1 \Delta R_4}{\Delta R^2_0 + 2R_0[\Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3 + \Delta R_4]} V_i \dots\dots\dots (3.18)$$

Si les variations relatives ΔR_1 et ΔR_2 sont faibles devant la valeur nominale R_0 , nous pouvons écrire la tension de décalage du pont sous la forme simplifiée suivante :

$$\frac{\Delta V_0}{V_i} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_2}{R_0} - \frac{\Delta R_1}{R_0} \right) \dots\dots\dots (3.19)$$

En considérant les résistance R_1 et R_2 comme le piézorésistifs longitudinale $(\frac{\Delta R}{R})_{\parallel}$ et transversale $(\frac{\Delta R}{R})_{\perp}$ respectivement, et en remplaçant leur expression dans l'équation (II.14) nous obtenons la tension de sortie du pont V en fonction de la pression appliquée P .

La variation de la tension de sortie est donc une fonction linéaire des variations des résistances du pont. En utilisant les expressions (3.18) et (3.19) des piézorésistances longitudinale $(\frac{\Delta R}{R})_{\parallel}$ pour $\frac{\Delta R_1}{R_1}, \frac{\Delta R_3}{R_3}$ et transversale $(\frac{\Delta R}{R})_{\perp}$ pour $\frac{\Delta R_2}{R_2}, \frac{\Delta R_4}{R_4}$ dans l'expression (II.21) de la tension de sortie, nous aurons alors :

$$\frac{\Delta V_0}{V_i} = \frac{1}{2} [(\pi_l - \pi_t)(\sigma_l - \sigma_t)] \dots\dots\dots (3.20)$$

Pour une membrane au silicium, usinée dans un plan(100)

$$\frac{\Delta V_0}{V_i} = \frac{1}{2} (\sigma_l - \sigma_t) \pi_{44} \dots\dots\dots (3.21)$$

En substituant les expressions des contraintes longitudinales $\sigma_{\parallel}$ et transversales $\sigma_{\perp}$ et en considérant les jauges ponctuelles nous pouvons représenter les courbes de variation de la tension de sortie du pont en fonction de la pression appliquée P .

Nous représentons les courbes de variation de $(\Delta R/R)_{\parallel}$ et $(\Delta R/R)_{\perp}$ en fonction de la

pression P sur les figures (3.6). Ces figures montrent l'opposition de signe entre les deux réponses.

Sur la figure (3.7) nous représentons la tension de sortie du pont de Wheatstone pour une tension de service V en fonction de la pression. Cette courbe est linéaire sur une large étendue de mesure.

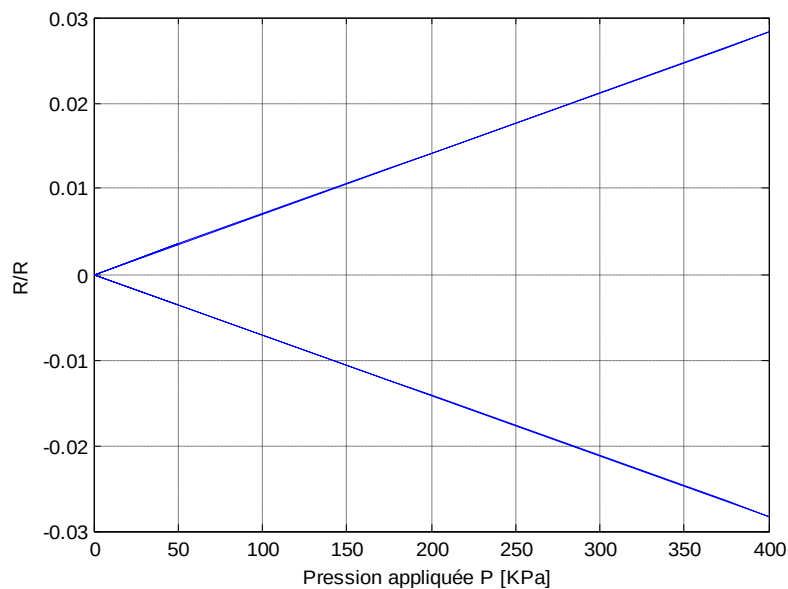


Figure (3.6) : courbes de variation de $(\Delta R/R)$ longitudinale et tangentielle en fonction de la pression appliquée P .

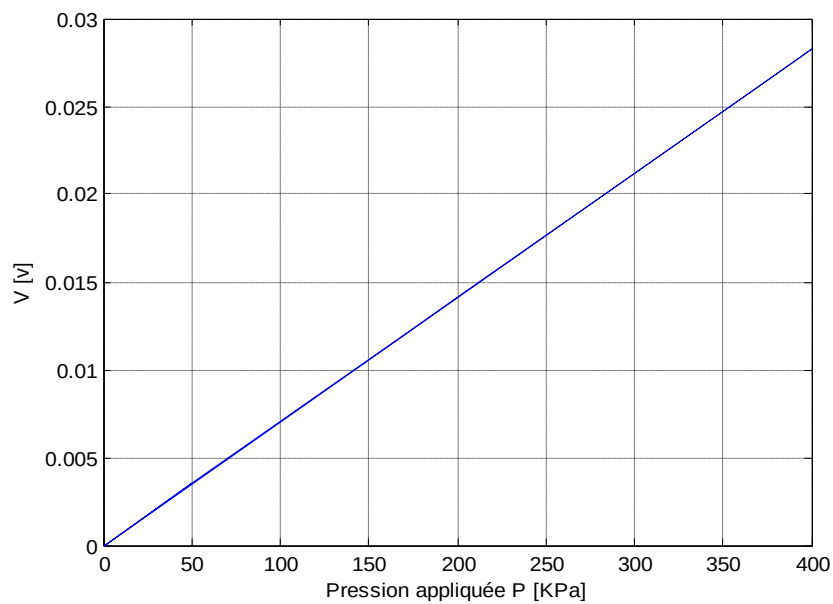


Figure (3.7): courbes de variation de la tension de sortie V du pont en fonction de la pression appliquée P .

III.6- Conclusion :

Ce chapitre a été consacré sur le développement analytique des modèles utilisés dont laquelle nous avons présenté facilement la résistivité sous la forme d'une seule équation varie uniquement en fonction de deux paramètres sont la température et le dopage et cela pour les quatre modèles.

On a vue que :

- a faible concentration des dopants la résistivité prend des grands valeurs.
- la résistivité a une valeur minimal a basse température et sa valeur augmente a température élevée.

Par la suite, nous avons développé une étude sur le capteur de pression piézorésistif. Cette dernière commence par une description de la structure du capteur et son principe de fonctionnement.

En générale, la réponse de la membrane est prélevée à partir de jauges semi-conductrices. Ces jauges sont placées au milieu des bords de la membrane, position optimale que l'on a déterminée, et montées en pont de Wheatstone.

Nous avons établi les expressions des déformations et des contraintes en fonction de La pression Les résultats obtenus doit être appliquée au niveau de l'expression de la tension pour avoir une expression en fonction de la pression.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'évolution rapide de la technologie de fabrication de composants au silicium a permis durant ses dernières années d'élargir le champ d'application de la microélectronique au domaine des capteurs, et ont ouvert la voie à une nouvelle discipline, alliant les techniques de l'électronique à celles de la mécanique.

Le cas le plus favorable de cette alliance est le capteur de pression à jauges piézorésistives implantées à la surface d'une membrane jouant le rôle d'un corps d'épreuve, dont le but d'avoir une sensibilité élevée à la pression et une bonne linéarité de la réponse.

Après avoir fait une étude bibliographique sur les capteurs, nous avons étudié le comportement d'une fine membrane de silicium de forme carrée et rectangulaire totalement encastré sur ses bords. En appliquant la méthode Galerkin pour avoir une équation simplifiée du système différentiel régissant le mouvement de la membrane.

Nous avons effectué la détermination des expressions de la déflexion de la membrane et des contraintes en tous points. Ceci a permis de localiser les points de la membrane, où les valeurs de contraintes sont maximales, qui deviendront les positions optimales des jauges de contraintes sur la membrane, pour réaliser des micros capteurs de pression piézorésistif performants. L'étude des déformations et des contraintes en fonction du rapport de dimension r_d montre qu'une membrane rectangulaire est la meilleure (pour $r_d = 0.5$).

Comme notre étude est basée sur le comportement thermique des jauges piezoresistif, nous avons travaillé avec des paramètres thermiques obtenus à partir des quatre modèles trouvés dans la littérature qui sont KLASSEN, ARORA, DORCKEL et MASETTI.

Dans cette optique, nous avons développés analytiquement les quatre modèles pour Arriver à une seule équation mathématique définie la résistivité ρ uniquement en fonction de deux paramètres électriques, la température et le dopage.

Les résultats obtenus montrent bien l'augmentation de la résistivité en fonction de la

température mais sa valeur diminue graduellement en fonction du dopage.

Ensuite, les résultats obtenus engendrés sur la membrane ont été appliqués à la modélisation d'un capteur de pression piézorésistif. Ce capteur est constitué d'une membrane sur laquelle sont diffusées ou implantées quatre jauges piézorésistives en silicium, connectées en pont de Wheatstone. L'emplacement des jauges et leurs orientations ont été choisies judicieusement afin d'obtenir une réponse optimale et linéaire.

Comme perspective, nous allons concrétiser la modélisation de la membrane par une application biomédicale (pied diabétique), en utilisant un capteur piézorésistif dotée de la membrane étudiée.

References bibliographiques

[1]: Georges Ash et Collaborators.

« Les capteurs en instrumentation industrielle »

Dunod/ Paris, 1999.5^{ème} édition.

[2]: H.Buyse F. Labrique P. Sente.

« Introduction à l'électronique et ses applications en instrumentations ».

Université Catholique de Louvain 2001

[3] :H. Smith.

« Piezorésistance effects in Germanium and silicon » .

Physical review, Vol.94, n°1, p.42, April 1954.

[4] : A. Permuy, E. Donzier, F. Rezgui

« Micro systèmes I », technique de l'ingénieur 3092, 05/2004.

[5] : A. Boukabache

« Conception, Modélisation et réalisation d'un capteur de pression piézorésistif à faible dérive thermique », Thèse de doctorat d'état de l'Université de Constantine, Rapport LAAS

N°93310, mars 1993.

[6]: F.Kerrour, F.Hobar.

«Nouvelle approche pour la resolution numerique de l'equation differentielle partielle de lagrange d'ordre 4 gouvernant la la deformation d'une membrane fine au silicium ».

1st international symposium on electromagnetism: satellites and cryptography isesc'05,2005

[7]:N.Ben moussa, S.Bouguima.

«Static response study of a microelectronic capacitive pressure sensor »,
1st international symposium on electromagnetism: satellites and cryptography
isesc'05,2005

[8]:J .F.Nye.

« Propriétés physiques des cristaux »

A graphical representation of the piezoresistance coefficients in Silicon.

IEEE Trans. On Electron Devices; Vol. 29, n°1, Jan. 1982.

[9] : F.Kerrou.

« Etude et modélisation des capteurs de pression piézorésistif et capacitifs au
silicon », Thèse de doctorat de l'Université Constantine 2008, Algérie

[10]: Y.L. Inden, L. Tenerz, and B.Hok

«Fabrication of three dimensional silicon structures by means of doping selective
etching»

Sensors and Actuators 1989(16), pp67.

[11] F. Schwierz, J. Juin Lion: «Modern Microwave Transistors : theory, design
and performances ». Edition, Jhon Wiley, New York, **(2003).**

[12] D.B.KLASSEN.

«a unified mobility for denice simulation- i.model equations and concentration
dependence »

solid-state electronics vol,n⁰ 7,pp953-959,1992.

[13] **J.M DORCKEL and PH.LETURCQ**

«carrier mobilities in silicon semi- empiricclly related to température doping and injection level ».

Solid-state électronique vol 24,n⁰9,pp 821-825,1981

[14] **NARAIN D.ARORA, JOHN R.HAUSER, and DAVID J.ROULSTON,**

«electron and hole mobilities in silicon as a function of concentration and temperature »

IEEE transactions on electron devices, vol. ed-29, n⁰. 2 , february 1982.

[15] **M. RAS-LAIN, A. CHAABI, A. BOUKABACHE**

«Étude des paramètres physico électriques des piezoresistances des capteurs de pression au silicium monocristallin ».

Conférence internationale sur les systèmes électronique (2005), 91-95