



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique
Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Cours pour Doctorants spécialités:
Matériaux/Microélectronique

Chapitre1: Phénomènes physiques liés aux Microcapteurs
Intégrés de déformation, force et pression

1. Jauges de déformation:

Les jauges de déformation permettent de mesurer de faibles déformations. De fait, elles ne servent en pratique que dans le domaine élastique.

D'un point de vue macroscopique, on définit la déformation conventionnelle, appelée « extension » et notée e , par :

$$e = \Delta l / l_0 \quad (1)$$

l_0 est la longueur initiale de la pièce, ou ici de la jauge;

Δl est la variation de la longueur sous charge,

$$\Delta l = l - l_0 \quad (2)$$

Cet allongement relatif est assimilé à la déformation vraie ϵ_I ; on a en effet $e \approx \epsilon_I$ pour les petites déformations.

Par ailleurs, le diamètre D de la pièce rétrécit, selon la loi :

$$\epsilon_{II} = -\nu \epsilon_I \quad (3)$$

$$\epsilon_I \approx \Delta D / D_0 \quad (4) : \text{déformation transverse;}$$

ν : coefficient de Poisson.

La contrainte, quant à elle, est une force divisée par une surface, elle est donc homogène à une pression et exprimée en pascals (Pa) ou plus fréquemment, en raison des ordres de grandeur, en mégapascals ($1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ N/mm}^2$). La contrainte est notée σ :

$$\sigma = F / S \quad (5)$$

F est la force de traction ou de compression;

S est l'aire de la section droite [1,2,7].

Les figures suivantes 1 et 2 représentent deux types de microcapteurs ou jauges de déformation à deux angles de déformation 45° et 60° .

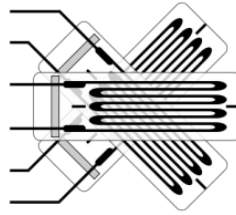


Figure1. Rosette rectangulaire (à 45°) [4]

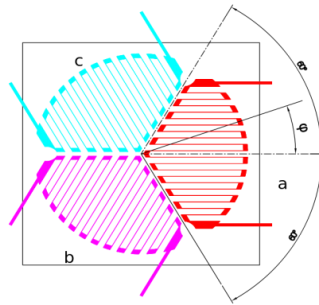


Figure2. Rosette équiangulaire (à 60°) [4,6]

2. Mécanisme de la piézorésistivité:

La piézorésistivité est la modification de la résistance de films métalliques, de semiconducteurs ou de films composites (cermet : céramique-métal) sous l'action de contraintes.

C'est la superposition de deux effets:

-Modification de la résistivité : par exemple dans un film constitué d'un polymère chargé de particules conductrices.

Sous l'action d'une force les distances séparant les particules peuvent varier, induisant une variation de la conductivité.

-Déformation géométrique (piézorésistivité géométrique):

-Modification du chemin entre deux électrodes sur un semiconducteur.

-Modification de la longueur et/ou de la section d'un conducteur.

Pour la conduction électrique des matériaux semiconducteurs, les changements dans l'espacement interatomique résultant de la souche affectent les largeurs de bande interdite, ce qui rend plus facile (ou plus difficile en fonction du matériau et de la souche) pour les électrons à être élevée dans la bande de conduction. Il en résulte un changement de résistivité du matériau. Dans une certaine plage de déformation de cette relation est linéaire, de sorte que le coefficient piézorésistif soit constant [4,14]

$$\rho_{\sigma} = (\partial\rho/\rho) / \varepsilon \quad (6)$$

Où:

$\partial\rho$:Variation de la résistivité.

ρ : résistivité originale.

ε : Strain.

3. Piézorésistivité dans les métaux:

Habituellement, le changement de résistance des métaux est principalement dû à la variation de la géométrie résultant de contrainte mécanique appliquée. Cependant, même si l'effet piézorésistif est faible dans ces cas, il est souvent négligeable. Dans les cas où il est, il peut être calculé en utilisant l'équation simple résistance dérivée de la loi d'Ohm:

Où:

$$R = \rho L/A \quad (7)$$

ρ : résistivité du métal [Ω/m].

L: longueur du conducteur [m].

A: Une zone transversale du flux de courant [m^2].

Certains métaux affichent une piézorésistivité qui est beaucoup plus grande que la variation de résistance due à la géométrie [14,15].

Dans les alliages de platine, par exemple, la piézorésistivité est supérieure à un facteur de deux plus grandes, en combinant les effets de la géométrie pour obtenir une sensibilité de jauge de contrainte pouvant aller jusqu'à plus de trois fois plus grande que du fait de la géométrie seuls effets. La piézorésistivité de nickel pur est 13 fois plus grande, éclipsant complètement et même inverser le signe du changement de résistance induite par la géométrie [14].

4. Piézorésistance:

La piézorésistance est le changement de conductivité d'un matériau dû à une contrainte mécanique. Elle a été mise en évidence pour la première fois par Lord Kelvin en 1856.

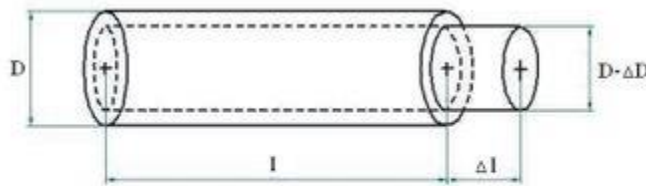


Figure3. Géométrie de la piézorésistance [2]

La résistance électrique d'une jauge cylindrique est donnée par :

$$R = \rho l/A = \rho 4l/(D^2\pi) \quad (8)$$

ρ : résistivité du conducteur;

l: sa longueur;

A: l'aire de sa section;

D: le diamètre de la section.

Donc après déformation de la jauge, on obtient :

$$R_0 + \Delta R = (\rho + \Delta\rho) / (4(1 + \Delta l)) / (D - \Delta D)^2 \pi \quad (9)$$

On peut alors exprimer la variation relative de la résistance par :

$$\Delta R / R_0 = k \Delta l / L_0 = k \varepsilon_l \quad (10)$$

k est la sensibilité d'un appareil piézorésistant, dépend principalement du constituant de la jauge;

$$\varepsilon_l = \Delta l / l \quad (11)$$

Δl est la variation relative de longueur;

R est la résistance [2,11].

5. Piézorésistance des métaux:

La piézorésistance d'un capteur métallique est due au changement de géométrie dû à la contrainte mécanique. Ce facteur géométrique du capteur se représente par la variable k :

$$k = 1 + 2\nu \quad (12)$$

ν représente le coefficient de Poisson du matériau.

$$\nu = \text{Contraction transversale unitaire} / \text{Allongement axial unitaire} \quad (13)$$

Même si les variations sont relativement faibles, elles permettent d'utiliser ces capteurs (jauge de contrainte) sur une large gamme d'utilisation [2,7].

6. Piézorésistance dans les semiconducteurs:

La variable k d'un semi-conducteur peut-être cent fois supérieure à celle des métaux. Les semi-conducteurs généralement utilisés sont le germanium et le silicium (amorphe ou cristallisé).

Une contrainte appliquée sur du silicium va modifier sa conductivité pour deux raisons : sa variation géométrique mais aussi sur la conductibilité intrinsèque du matériau. Il en résulte une amplitude bien plus importante que pour des capteurs métalliques.

L'effet piézorésistif de matériaux semiconducteurs peut être de plusieurs ordres de grandeur plus grand que l'effet géométrique et est présent dans des matériaux tels que du germanium, du silicium polycristallin, du silicium amorphe, du carbure de silicium et de silicium monocristallin. Par conséquent, des jauges de contrainte semiconducteur avec un coefficient très élevé de sensibilité peuvent être construits. Pour les mesures de précision, ils sont plus difficiles à manipuler que des jauges de contrainte en métal, parce que des jauges de

contrainte à semiconducteurs sont généralement plus sensibles aux conditions environnementales (surtout la température T) [11,15].

Pour le silicium, les facteurs de calibre peuvent être de deux ordres de grandeurs supérieures à celles observées dans la plupart des métaux. La résistance de n-conductrice de silicium principalement des changements dus à un décalage de trois paires différentes des vallées conductrices. Le déplacement provoque une redistribution des transporteurs entre vallées avec différentes mobilités. Il en résulte variable dépendant de la direction des mobilités du courant. Un effet secondaire est dû à la variation de la masse effective liée à l'évolution des formes des vallées. Dans p-conductrice de silicium phénomènes sont plus complexes et entraînent également des changements de masse et de transfert de trous.

7. Piézorésistance géante dans les structures hybrides métal-silicium:

Un effet piézorésistif géant où le coefficient piézorésistif dépasse la valeur apparente a été rapportée pour un microfabriqué structure hybride de silicium-aluminium [11]. L'effet a été appliqué aux technologies de capteurs à base de silicium.

8. Effet piézorésistif géant dans les nanostructures de silicium:

Le coefficient piézorésistif longitudinal du haut vers le bas fabriqué silicium nanofils a été mesurée comme étant de 60% plus grande que dans le silicium en vrac. En 2006, piézorésistance géant a été signalé en bas vers le haut fabriqué silicium nanofils a > 30 augmentation du coefficient piézorésistif longitudinal par rapport au silicium massif a été signalé [11,14]. La suggestion d'un piézorésistif géant a depuis suscité beaucoup d'efforts dans une compréhension physique de l'effet.

9. Piézorésistance des capteurs en silicium:

La piézorésistance des semi-conducteurs a été utilisée avec un grand nombre de matériaux (germanium, silicium polycristalin ou amorphe, ...). Le silicium étant aujourd'hui largement utilisé dans les circuits intégrés, l'utilisation des capteurs et microcapteurs à base de silicium est largement répandue et permet une bonne intégration des jauges de contraintes avec les circuits bipolaires ou CMOS.

Cela a permis une grande gamme d'utilisation de la piézorésistance. Beaucoup d'appareils commerciaux comme les capteurs d'accélération utilisent des capteurs en silicium [11].

10. Fabrication et physique de fonctionnement d'une Piézorésistance:

Les piézorésistances ou piézorésistors sont des résistances variables faites à partir d'un matériau piézorésistant et sont utilisées pour les jauges de contraintes, couplées avec un pont de Wheatstone. Les Piézorésistances peuvent être fabriqués en utilisant grande variété de matériaux piézorésistifs. La forme la plus simple de capteurs piézorésistifs en silicium sont des résistances diffusées. Les piézorésistances sont constituées d'un simple à deux contacts diffusés n- ou puits de p dans un p- ou n-substrat. Comme les résistances carrées typiques de ces dispositifs sont de l'ordre de plusieurs centaines d'ohms, p+ ou n+ plus diffusions supplémentaires sont un procédé potentiel pour faciliter les contacts ohmiques sur le dispositif (Figure4).

Pour les valeurs de contraintes typiques dans la MPa gamme la chute de tension dépendante de la tension le long de la résistance V_r , peut être considérée comme linéaire. La piézorésistif aligné avec l'axe des x comme représenté sur la figure peut être décrit par:

$$V_R = R_0 I [1 + \pi_L \sigma_{xx} + \pi_T (\sigma_{yy} + \sigma_{zz})] \quad (14)$$

Où, I , et désignent la contrainte libre résistance, le courant, la direction transversale et les coefficients piézorésistifs longitudinaux appliqués [11,14], et les trois composantes de contrainte de traction, respectivement. Les coefficients piézorésistifs varient de façon significative avec l'orientation du capteur par rapport aux axes cristallographiques et avec le profil de dopage. En dépit de la sensibilité au stress assez grand nombre de résistances simples, ils sont utilisés de préférence dans des configurations plus complexes éliminant certaines sensibilités croisées et les inconvénients. Les résistances piézoélectriques présentent l'inconvénient d'être très sensible aux variations de température tout en présentant relativement de petites variations d'amplitude du signal dépendant du stress relatif

$R_0 \pi_T \pi_L \sigma_{ij}$ [11].

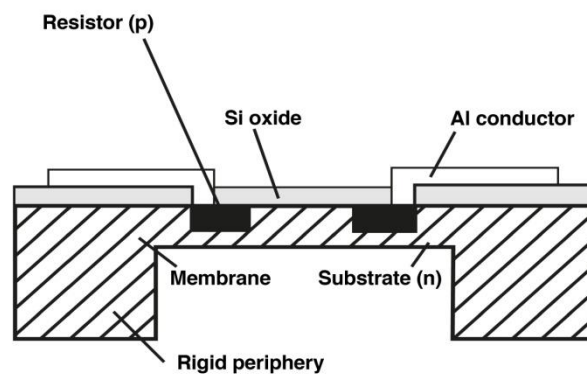


Figure4. Schématique en coupe transversale des éléments de base d'un silicium n-well piézorésistif [11]

11. Application à la mesure:

La mesure ne peut s'effectuer directement car les variations de conductivité de la jauge sont trop faibles pour être mesurées directement avec un ohmmètre. Il est nécessaire de faire un montage en pont de Wheatstone.

Soit un circuit constitué de quatre résistances R_1, R_2, R_3, R_4 montées en pont. On alimente par une source électromotrice V_e suivant la diagonale AC. À l'équilibre la tension de sortie entre B et D est nulle mais la variation d'une quelconque des résistances fait apparaître une tension V_s .

Pour de très faibles variations (de l'ordre du microohm pour les jauges de contrainte), la sortie V_s est proportionnelle aux variations relatives $\Delta R/R$ de chacune des résistances. En négligeant les termes d'ordres supérieurs, elle vaut :

$$V_s = (V_e/4)((\Delta R_1/R_1) - (\Delta R_2/R_2) + (\Delta R_4/R_4) - (\Delta R_3/R_3)) \quad (15)$$

Dans la pratique, ces résistances sont souvent d'autres jauges (une, deux ou quatre). L'alternance des signes + et - caractérise la propriété fondamentale des ponts : deux résistances adjacentes agissent en sens opposé et deux résistances opposées agissent dans le même sens. On peut donc réduire les variations parasites (comme la température) et avoir une meilleure précision [5,6].

Un capteur à quatre jauges permet d'avoir encore une meilleure précision qu'un capteur à une jauge. Dans la pratique, le nombre de jauges est souvent dicté par la géométrie de la pièce [6].

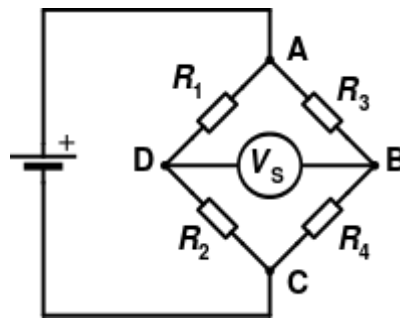


Figure5. Pont de Wheatstone

12. Effets parasites:

12.1. Température:

D'une part, la dilatation différentielle entre jauge et support, d'autre part, les effets thermoélectriques liés à un écart de température entre deux points de raccordement (on peut éliminer ce problème en alimentant les jauges en alternatif).

Pour minimiser l'influence de la température, on peut utiliser une configuration en double pont. Une jauge active, soumise à la déformation et aux variations de température, et une jauge passive soumise uniquement aux variations de température.

En pratique, pour corriger les dérives de pente (sensibilité) en température, on place dans les deux branches d'alimentation une résistance en Nickel pur. Ces résistances vont modifier la tension d'alimentation aux bornes du pont de manière à compenser la dérive thermique.

La dérive du signal à vide est un autre phénomène lié à la température (sans contrainte mécanique sur le corps d'épreuve). Cette dérive est aléatoire et est intrinsèque au pont de jauges. La correction se fait sur une branche du pont (dépendant du sens de la dérive) par l'ajout d'un bobinage de cuivre (lui-même va occasionner une dérive contraire à celle des jauges) [1,4].

12.2. Hystérésis:

Un capteur présente un phénomène d'hystérésis si l'information qu'il délivre est différente suivant que les mesures sont effectuées sous charge croissante ou décroissante. Cette source d'erreur est donc particulièrement gênante dans le cas de cycles de mesures avec montée et descente en charge répétées, ou en fonctionnement dynamique. L'hystérésis peut être positive ou négative. Contrairement à l'écart de linéarité, il n'est pas aussi simple de la compenser avec l'électronique de mesure. Il s'agit en effet d'une caractéristique liée aux matériaux constituant le corps d'épreuve et à la liaison corps d'épreuve-détecteur. Les aciers inoxydables, par exemple, présentent une hystérésis positive importante et des traitements thermiques sont nécessaires afin de limiter ce phénomène. On peut aussi contrôler la dureté des feuilles de constantan [6].

12.3. Erreur de linéarité :

Un capteur présente une erreur de linéarité lorsque la courbe force-signal capteur n'est pas une droite parfaite. L'erreur de linéarité d'un capteur de force dépend du design du capteur (par exemple, lorsque la force croît, la répartition des forces varie ce qui influence la linéarité), mais aussi du choix des jauges. L'erreur de linéarité est toujours à minimiser [7].

En production de série, le capteur est calibré en passant par deux points : le zéro et la force nominale. En minimisant l'erreur de linéarité, cette calibration suffit. Si l'erreur de linéarité est importante, il est nécessaire de passer par plusieurs points intermédiaires d'étalonnages.

13. Fonctionnement des capteurs de force à jauges:

Un capteur de force est constitué de jauges de déformation identiques. Le principe étant de traduire en variation de résistance électrique la déformation du corps d'épreuve sur lequel elles sont collées.

13.1. Principe de fonctionnement des jauges :

Le fonctionnement des capteurs à jauges est fondé sur la variation de résistance électrique de la jauge proportionnellement à sa déformation. C'est le coefficient ou facteur de jauge k qui traduit cette proportionnalité, suivant la relation:

$$\Delta R/R = k\Delta L/L \quad (16)$$

k est une constante qui dépend des matériaux considérés et de la température. Elle caractérise la sensibilité de la jauge [2,4].

13.2. Corps d'épreuve du capteur de force :

Il existe différentes formes de capteurs à jauges :

- Capteurs de force en S pour des mesures en traction / compression;
- Capteurs de force « pancake » pour des mesures en traction / compression;
- Pesons de compression standard ou miniature;
- Capteurs à moment constant ou à cisaillement utilisés pour des applications de pesage [5].

13.3. Matériaux utilisés:

- Aciers inoxydables utilisé en milieu corrosif.
- Alliages d'aluminium.

Références bibliographiques:

1. Jean-Louis Fanchon, Guide de mécanique, Nathan, 2001 (ISBN 978-2-09-178965), p.427-432.
2. Capteurs de pesage : Jauges de contrainte ou capteurs à compensation électromagnétique, mesures.com (lire en ligne [archive]).
3. J.C.Gibson, The definition, understanding and design of aircraft handling qualities, Delft University Press, 1997 (lire en ligne [archive]), p.46.
4. G.Amendola, P.Poulichet, L.Sevely, L,Valbin. Les capteurs MEMS, principes de fonctionnement. Techniques de l'Ingénieur.
5. G.Amendola, P.Poulichet, L.Sevely, L,Valbin. Capteurs MEMS, techniques de mesure. Techniques de l'Ingénieur.
6. S.Paineau, P.Andreucci, C.Schaffnit, S.Magaton. Microsystèmes:applications et mise en oeuvre. Techniques de l'ingénieur.

7. Les capteurs en instrumentation industrielle-7ème édition,de Georges Asch,DUNOD.
- 8.<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/mesures-de-longueurs-et-d-angles-42408210/capteurs-a-jauges-extensometriques-r1860/>
9. <https://www.techniques-ingenieur.fr/glossaire/jauge-de-deformation>
10. http://www.lycee-ferry-versailles.fr/si-new/7_3_rdm/rdm/Jauge_de_contrainte.pdf
11. Y.Kanda, "piézorésistifs Effet de la Silicon," Sens. Actionneurs, vol. A28, non. 2, pp. 83-91, 1991.
12. S.Middelhoek et SA Audet, Silicon Sensors, Delft, Pays-Bas: Delft University Press, 1994.
13. AL Fenêtre, technologie de jauge de contrainte, 2nd ed, Londres, Angleterre: Elsevier Science appliquée, 1992.
14. C.S.Smith, "Effet piézorésistifs dans Germanium et Silicon," Phys. Rev., vol. 94, no. 1, pp. 42-49, 1954.
15. SM Sze, Semi-conducteur Capteurs, New York: Wiley, 1994.