Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 76 (1985)

Heft: 5

Artikel: Capteurs de pression piézorésistifs

Autor: Wenger, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904575

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Capteurs de pression piézorésistifs

A. Wenger

Des procédés modernes d'usinage du silicium, d'assemblage et de compensation thermique ont permis la réalisation d'une nouvelle ligne de capteurs piézorésistifs caractérisés par une excellente stabilité. Les étendues de mesure vont de 0,1 à 1000 bar en utilisant la même construction de base. La stabilité thermique est typiquement de 0,5% pour la sensibilité et le zéro pour l'intervalle de température −20 °C à +120 °C. D'autres propriétés sont une bonne linéarité (0,1–0,3%), une très bonne résistance aux cycles de pression et un bon comportement en milieu corrosif.

Moderne Methoden der Siliziumbearbeitung, des Aufbaus und der Kompensation haben zu einer neuen Linie von piezoresistiven Aufnehmern mit ausgezeichneter Stabilität geführt. Druckbereiche von 0,1 bar bis 1000 bar werden in einer einheitlichen Grundtechnologie ausgeführt. Es werden typische Temperaturstabilitäten von 0,5% für Nullpunkt und Empfindlichkeit im Temperaturbereich −20 °C bis +120 °C erreicht. Weitere Eigenschaften sind gute Linearität (0,1–0,3%), hohe Druckzyklenbelastbarkeit und gute Korrosionsbeständigkeit. Anhand von Beispielen wird erläutert, wie die verschiedenen, auf die Stabilität negativ wirkenden Einflüsse beseitigt werden.

Conférence présentée lors de la journée sur «Silicon Sensors» organisée par IEEE Swiss Section, Chapter on Solid Stade Devices and Circuits, le 16 octobre 1984 à Berne.

Adresse de l'auteur

Alfred Wenger, Dr sc.nat., Kistler Instrumente AG, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur.

1. Introduction

Les capteurs de pression dont il est question ici utilisent comme agent de transduction la variation de résistance électrique du silicium monocristallin en fonction de l'état de tension mécanique. Cet effet, appelé effet piézorésistif, est relativement complexe.

Il est d'abord fortement anisotrope, ce qui le distingue fondamentalement de l'effet analogue utilisé dans les jauges de contrainte métalliques. La figure 1 donne la variation des coefficients piézorésistifs (liant la variation de résistance électrique aux tensions mécaniques) dans le plan (001) [1]. Il existe un maximum prononcé dans la direction [110], qui est la direction choisie dans les capteurs décrits plus loin.

Cet effet est ensuite fortement dépendant de la température et du dopage, comme le montre la figure 2. Enfin, la nonlinéarité de l'effet piézorésistif dans le silicium est beaucoup plus forte que dans les jauges métalliques.

Malgré cela, les capteurs de pression piézorésistifs au silicium connaissent un développement rapide dû aux circonstances suivantes [2]:

- Les coefficients piézorésistifs du silicium sont 10 à 100 fois plus élevés que dans les métaux, ce qui facilite la transmission et le traitement des signaux.
- Le silicium, pour des températures inférieures à 600 °C, ne présente pas d'hystérèse mécanique mesurable, ceci jusqu'à la rupture.
- La fabrication des cellules de pression au silicium bénéficie du stade très développé des technologies des circuits intégrés.

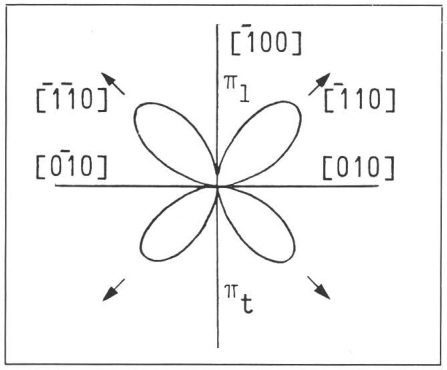

Fig. 1 Dépendance angulaire des coefficients piézorésistifs longitudinaux et transverses (π_l et π_t) dans le plan (001) pour le silicium de type *p* [1]

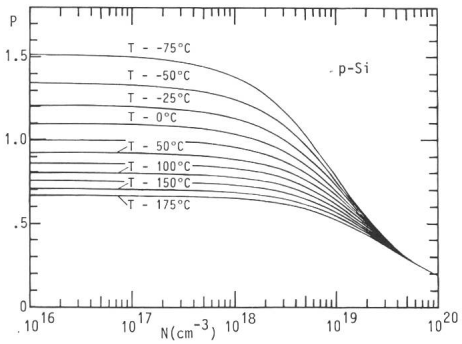

Fig. 2 Variation calculée de la valeur des coefficients piézorésistifs *p* avec le dopage et la température pour le silicium de type *p* [1]

N nombre d'atomes de bor par cm³

On peut distinguer deux directions principales dans le développement des capteurs piézorésistifs: la première, quantitativement la plus importante, est dans la fabrication industrielle de masse de capteurs pour applications automobiles, biomédicales, ménagères, etc. Les caractéristiques principales de ces capteurs sont:

- leur faible prix,
- un nombre très limité de domaines de pression dans la région 1 à 10 bar, où un haut degré d'automation de la compensation et de la calibration est possible,
- l'état avancé de l'intégration des circuits de compensation, d'amplification et d'alimentation sur la cellule de mesure,
- une résistance chimique et électrique au milieu à mesurer faible à moyenne,

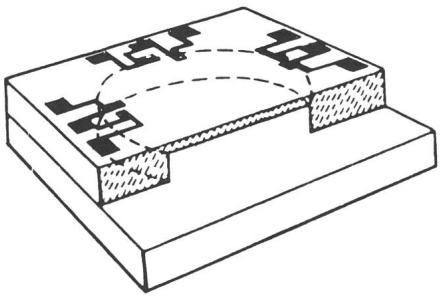

Fig. 3 Cellule de la première génération
Membrane usinée mécaniquement, puce soudée eutectiquement sur une base de silicium

- un boîtier très spécialisé, souvent de qualité médiocre.

La deuxième direction a pour objet le développement d'une gamme de capteurs à usage non spécialisé (large gamme de pressions, bonne résistance à différents milieux, boîtier adapté à ces deux exigeances) et possédant d'excellentes qualités métrologiques, en particulier en ce qui concerne la stabilité. Le présent article décrit un tel développement.

2. La cellule piézorésistive

Une première génération de cellules [3], en fabrication depuis plus de 10 ans, est représentée schématiquement sur la figure 3. Des résistances sont implantées et diffusées dans des plaquettes de silicium [2]. Les plaquettes sont découpées en puces, chaque puce est ensuite usinée mécaniquement pour créer une membrane circulaire plus ou moins mince selon le domaine de pression. Cette puce est alors soudée eutectiquement à une plaquette de base, réalisant ainsi une référence de vide.

Dans les cellules de la nouvelle génération, réalisées en collaboration avec le Centre Electronique Horloger[1]), la membrane n'est plus ronde, mais carrée et est obtenue par attaque anisotrope (fig. 4). Ceci a trois avantages:

a) La formation de la membrane de toutes les cellules d'une même plaquette (plusieurs centaines) est réalisée simultanément.

b) Contrairement à l'usinage mécanique, l'attaque chimique ne provoque pas de microdommages structuraux, ce qui a un effet positif sur la stabilité du capteur.

c) Les positions relatives de la membrane et des résistances implantées sont beaucoup plus précises; ceci donne une homogénéité plus grande dans les caractéristiques métrologiques de la cellule. Sur la figure 4, R_1, R_2, R_3, R_4 sont les quatre piézorésistances implantées dans le silicium. Leur direction est (110), le plan de la plaquette est (001). Lorsque, sous l'effet de la pression, la membrane se déforme, R_1 et R_3 subissent une variation ΔR, R_2 et R_4 une variation $-\Delta R$ [2]. Les quatre résistances étant connectées en pont de Wheatstone, on a un signal égal à

$$V_s = V_a \cdot \Delta R / R = V_a \cdot \frac{l^2}{h_2} \alpha \pi p \qquad (1)$$

où V_a est la tension d'alimentation du pont, π le coefficient piézorésistif dans les figures 1 et 2, a est un facteur géométrique de l'ordre de 10^{-1} et p est la pression.

La plaquette est ensuite fixée par soudure anodique sur une plaque de verre ayant ou non des trous selon qu'il s'agit de capteurs de pression relative ou absolue (fig. 5). Par rapport à la soudure eutectique, ce type de liaison a l'avantage de ne présenter aucune hystérèse mécanique et de garantir une très bonne isolation électrique par rapport au boîtier (>1000 V).

L'étape suivante est le découpage de la plaquette silicium et verre. Dans certaines applications, la puce ainsi obtenue peut être directement collée au boîtier.

L'expérience a cependant montré que pour obtenir une grande fiabilité et une excellente stabilité thermique, la construction de la figure 6 était idéale. Dans cet élément, dit «Tensosymmetric» (demande de brevet déposée), la puce de silicium avec son support en verre (1+2) et fixée par frittage à une puce de silicium (3), réalisant ainsi une structure quasi-symmétrique silicium-verre-silicium. Ce «sandwich» est lui-même fixé par frittage à une embase (4) d'un alliage Fe-Ni-Co ayant un coefficient de dilatation thermique très voisin de celui du silicium. L'ensemble ainsi formé peut alors être soudé à un boîtier en métal (5). Ce mode de fixation donne une excellente isolation de l'élément sensible (1) par rapport aux tensions d'origine mécaniques ou thermiques pouvant exister dans le boîtier (5). De plus, l'absence de tout composé organique dont les propriétés peuvent se dégrader à long terme est une condition nécessaire pour assurer une bonne stabilité à long terme.

3. L'encapsulation

La figure 7 donne une coupe schématique d'un capteur terminé. Une

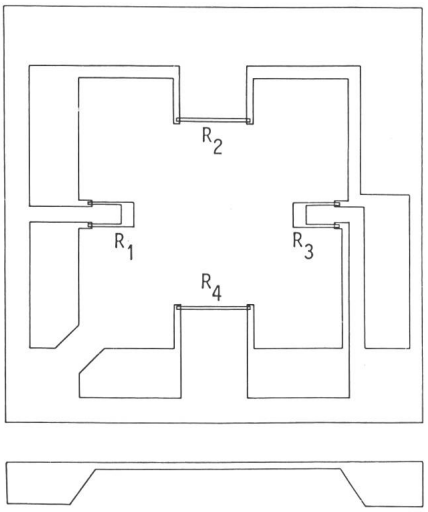

Fig. 4 Disposition des résistances et forme de la membrane pour les cellules de la nouvelle génération
$R_1 \ldots R_4$ piézorésistances

[1]) A présent: Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique S.A. (CSEM), Neuchâtel.

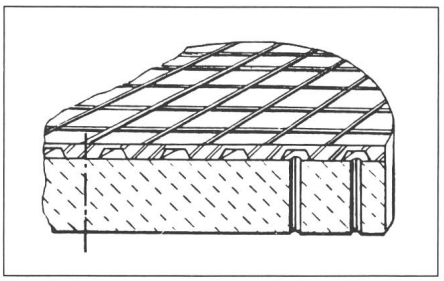

Fig. 5 Plaquette de silicium fixée sur une plaque de verre par soudure anodique

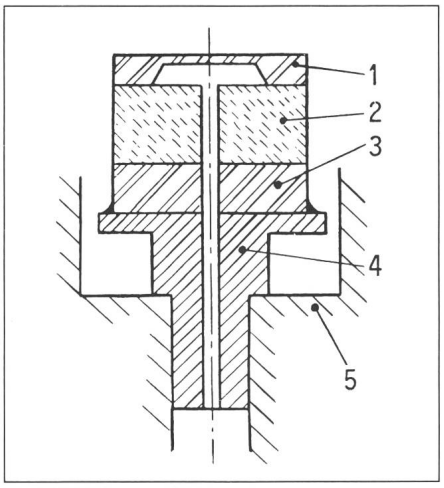

Fig. 6 Elément «TENSOsymmetric»
1 Cellule de silicium
2 Support de verre
3 Puce de silicium
4 Embase en alliage Fe-Ni
5 Support

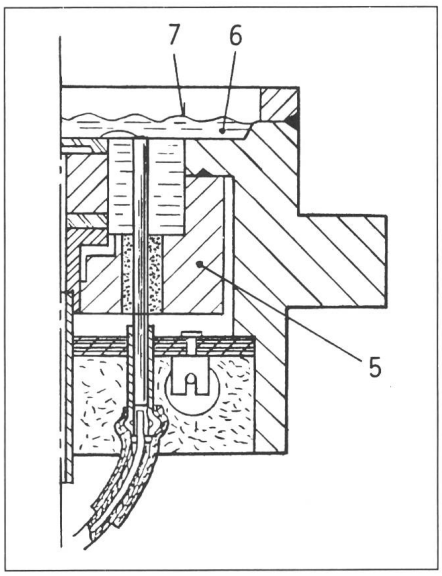

Fig. 7 Coupe schématique d'un capteur terminé

5 Support contenant les connexions électriques et sur lequel est soudé l'élément de la figure 6
6 Coussin d'huile silicone
7 Membrane de séparation

membrane en acier inoxydable (7) et un coussin d'huile protègent la cellule de silicium du milieu ambiant. Cette solution, bien que relativement coûteuse, a les avantages suivants:

- une bonne résistance à la corrosion dans la plupart des milieux (des versions spéciales en Monel ou Corronel donnent des résistances encore 10 à 100 fois plus grandes);
- une parfaite isolation électrique de la cellule par rapport au milieu à mesurer, même pour des tensions de l'ordre de 1000 V;
- une excellente isolation thermique de l'élément de mesure en silicium lors de chocs thermiques.

La figure 8 montre un capteur terminé.

Fig. 8 Exemple d'un capteur terminé

4. Compensation thermique et caractéristiques métrologiques

Le coeffizient thermique du facteur π apparaissant dans l'équation (1) est de l'ordre de 2000 à 3000 ppm/°C (négatif), celui de la résistance du pont 1000 à 3500 ppm/°C (positif). Nous utilisons trois méthodes différentes de compensation:

- Dans la première méthode l'autocompensation partielle des dépendances thermiques du coefficient piézorésistif π et de la résistance R est utilisée [3]. Le pont de Wheatstone est alimenté en courant constant et une résistance, dépendante ou non de le température, est connectée *parallèlement* au pont. On obtient ainsi une variation de la sensibilité compensée de 1 à 2% de −20 °C à + 120 °C. Le signal de sortie pleine échelle est environ 500 mV pour un courant d'alimentation de 4 mA.
- Dans la deuxième méthode, le capteur est alimenté en tension constante, ce qui est plus commode pour l'utilisateur. La compensation est obtenue en connectant des résistances en *série* et en *parallèle* avec le pont de Wheatstone. La qualité de la compensation est comparable à celle de la première méthode.

Ces deux premières méthodes sont dites passives, car elles n'utilisent que des éléments passifs (résistances sensibles ou non à la température). Le signal de sortie est proportionnel au courant (ou à la tension) d'alimentation.

- Dans la troisième méthode, un élément sensible à la température (transistor ou diode) commande une source de tension variable alimentant le pont de Wheatstone. La théorie [1] et l'expérience montrent que celle-ci doit être sensiblement proportionnelle à la température. Ce type de compensation est dit actif. La figure 9 donne un exemple des résultats obtenus avec ce type de compensation. La variation de la sensibilité dans l'intervalle −20 °C à +120 °C est de l'ordre de 0,5%, soit une réduction d'un facteur 50 par rapport au capteur non compensé. Un régulateur de tension est incorporé dans le circuit, de sorte que le capteur peut être alimenté par une tension non stabilisée. De plus, le signal est normalisé (150 mV ±1% pour les capteurs de la figure 9).

La compensation du zéro est obtenue en plaçant deux résistances respectivement en parallèle et en série avec

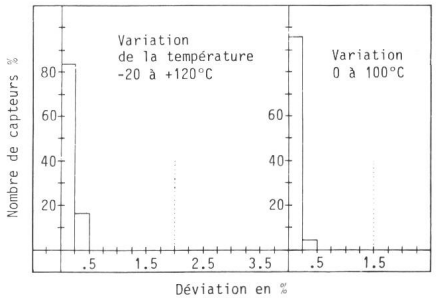

Fig. 9 Histogramme de la variation maximale de sensibilité de capteurs à compensation active sur un intervalle donné de température

Abscisse: Variation maximale de sensibilité en % sur l'intervalle de température. Lot de 24 capteurs du type 0,5 bar relatif.

..... valeur selon spécification

une des quatre résistances du pont. La figure 10 donne un exemple du résultat obtenu.

En résumé, on voit qu'en dépit des fortes dépendances en température des coefficients piézorésistifs et de la résistivité du silicium, il est possible de faire des capteurs ayant une très bonne compensation thermique. Il convient cependant d'ajouter que ceci n'est possible que par un ajustage individuel de chaque capteur, ce qui n'est pas sans influence sur le prix.

Pour ce qui est de la linéarité, on obtient des erreurs de l'ordre de 0,1 à 0,3% en dépit de la forte nonlinéarité intrinsèque de l'effet piézorésistif (1-2% pour des déformations de 1‰), ceci par compensation des effets non linéaires des quatre résistances du pont.

5. Stabilité

En plus de la stabilité thermique, il faut considérer la stabilité «historique», définie comme étant l'écart, en

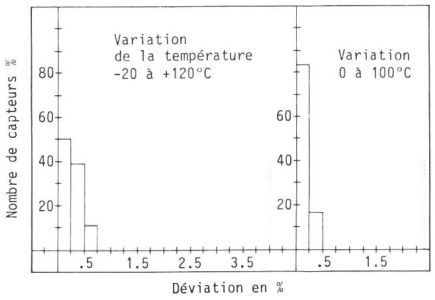

Fig. 10 Histogramme de la variation maximale du point zéro sur un intervalle donné de température (en % de la sensibilité pleine échelle)

Lot de 18 capteurs du type 10 bar relatif, alimentés à courant constant

..... valeur selon spécification

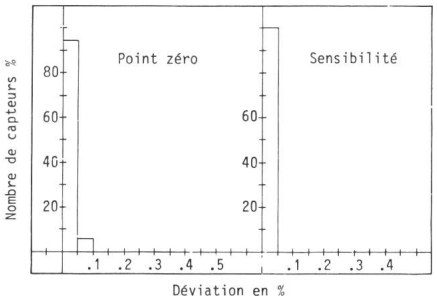

Fig. 11 Histogramme de la reproductibilité thermique sur l'ensemble de capteurs de la figure 10

Abscisse: Variation en % de la pleine échelle du point zéro et de la sensibilité après un cycle thermique.

% du signal pleine échelle, entre deux mesures faites dans des conditions identiques, mais séparées dans le temps. C'est une notion complexe, puisque'entre ces deux mesures, le capteur peut avoir subi une variété de traitements différents, qu'il convient de préciser:

- La reproductibilité au sens étroit, où l'on décrit un cycle de pression entre les deux mesures, est excellente pour les capteurs au silicium, même si l'on dépasse d'un facteur 2 à 10 l'étendue de mesure nominale. Elle est typiquement inférience à 0,05%, dans toute la gamme de pressions étudiée (0,1-1000 bar).

Variations de la sensibilité (E) et du point zéro (NP), exprimées en % de la pleine échelle, après $18 \cdot 10^6$ cycles de pression à 350 bar. Gamme nominale des capteurs: 200 bar

Tableau I

N°	ΔE(%)	ΔNP(%)
1	−0,004	−0,03
2	−0,011	+0,09
3	−0,105	−0,05

- La reproductibilité thermique, où l'on décrit un cycle thermique. La figure 11 donne le résultat d'une série de capteurs pour un cycle compris entre −20 °C et +120 °C.

- Cycles de pression. Le tableau I donne les variations observées sur trois capteurs de 200 bar cyclés $18 \cdot 10^6$ fois à 350 bar. Pour les domaines de pression plus faibles, on obtient des résultats semblables, mais avec des facteurs de surpression beaucoup plus grands (>10 pour 0,1 bar).

- Cycles de pression et de température. Le tableau II donne les variations observées sur trois capteurs ayant subi 300 cycles de température et $4 \cdot 10^6$ cycles de pression.

Tous ces exemples montrent que la stabilité de ces capteurs est en générale bonne. Il arrive cependant que des

Variation du point zéro (NP), exprimée en % de la pleine échelle, après 300 cycles de température −30 °C → +100 °C et $4 \cdot 10^6$ cycles de pression à 7 bar. Gamme nominale des capteurs: 5 bar relatif.

Tableau II

N°	1	2	3
ΔNP(%)	−0,36	+0,05	−0,11

capteurs, bien que stables pendant un cycle de calibration, présentent par la suite une certaine dérive. Afin de déceler ces échantillons, chaque capteur est soumis à un test complexe comportant en particulier 60 cycles où le capteur est pendant 30 min à pression maximale et à température relativement élevée. Après chaque cycle, le zéro du capteur est mesuré. L'analyse de la courbe ainsi obtenue montre si le capteur est susceptible d'une dérive ou non.

Bibliographie

[1] *Y. Kanda:* A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon. IEEE Trans. ED 29(1982)1, p. 64...70.

[2] *S. Ansermet:* Réalisation d'éléments sensibles piézorésistifs pour capteurs de pression. Conférence sur l'application des senseurs en microtechnique 1984. Neuchâtel, Institut de Microtechnique de l'Université de Neuchâtel, 1985; p. 35...40.

[3] *H. R. Winteler* and *G. H. Gautschi:* Piezoresistive pressure transducers. Transducer '79 Conference, London, 1979.