



**HAL**  
open science

## Étude du pouvoir thermoélectrique de couches de polysilicium dopées N et P de 20 à 450 °C

Malika Aithammouda, Katir Ziouche, Mehdi Haffar, Pascale Godts, Didier Leclercq

► **To cite this version:**

Malika Aithammouda, Katir Ziouche, Mehdi Haffar, Pascale Godts, Didier Leclercq. Étude du pouvoir thermoélectrique de couches de polysilicium dopées N et P de 20 à 450 °C. MajecSTIC 2005 : Manifestation des Jeunes Chercheurs francophones dans les domaines des STIC, IRISA – IETR – LTSI, Nov 2005, Rennes, pp.368-372. inria-00000730

**HAL Id: inria-00000730**

**<https://inria.hal.science/inria-00000730>**

Submitted on 15 Nov 2005

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Etude du pouvoir thermoélectrique de couches de polysilicium dopées N et P de 20 à 450 °C

M. Aithammouda, K. Ziouche, M. Haffar, P. Godts, D. Leclercq

Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologies, UMR CNRS 8520

IEMN-DHS, Avenue Poincaré BP 60069, 59652 Villeneuve d'Ascq Cedex France

malika.yala@iemn.univ-lille1.fr

katir.ziouche@iemn.univ-lille1.fr

**Résumé :** L'objectif de cette étude est de mettre au point des microthermocouples en polysilicium dopé dont le pouvoir thermoélectrique est pratiquement indépendant de la température de 20 à 450 °C. Cette caractéristique est indispensable pour réaliser des microcapteurs de flux thermique de sensibilité quasi-constante dans toute la gamme d'utilisation.

Dans ce but des cellules thermoélectriques spécifiques ont été réalisées à partir de couches de polysilicium dopées N et P. Les dopants bore et arsenic ont été choisis car ils procurent des coefficients de température de signes opposés.

Pour déterminer les valeurs idéales de dopage un système de mesure du pouvoir thermoélectrique en fonction de la température a été développé au laboratoire. Les caractéristiques des couches thermoélectriques réalisées sont présentées dans cet article.

**Mots Clés :** microcapteurs, flux thermique, pouvoir thermoélectrique, tension Seebeck, polysilicium, microtechnologie.

## 1 INTRODUCTION

La mesure du flux thermique total échangé entre deux milieux, présente un grand intérêt, puisqu'elle permet d'établir directement des bilans énergétiques. Le domaine d'applications est très large : automobile, électroménager, domotique, médecine... C'est pourquoi nous développons actuellement une nouvelle génération de microcapteurs de flux thermique en technologie silicium, dont la température maximale de fonctionnement prévue est de 450°C.

La structure originale de ces microcapteurs ne peut être divulguée car elle fait l'objet d'un dépôt de brevet en cours. Une étude bibliographique et les recherches en antériorité ont montré que très peu d'équipes travaillent actuellement sur ce sujet.

Le principe de fonctionnement des microfluxmètres thermiques réalisés au laboratoire est basé sur la conversion du flux thermique en gradients périodiques

de température exploités à l'aide d'une thermopile plane constituée par l'association d'un grand nombre de micro-thermocouples agencés en série. La thermopile délivre une tension qui est proportionnelle aux différences de température induites et en conséquence à la densité de flux thermique traversant le capteur.

L'exploitation de la tension Seebeck délivrée par un thermocouple montre la nécessité d'ajuster un certain nombre de paramètres caractéristiques des matériaux utilisés [1], [2]. En effet, afin d'obtenir une tension élevée, un pouvoir thermoélectrique important sera recherché mais la résistance électrique interne du thermocouple doit rester faible afin de minimiser le bruit de Johnson. Par ailleurs la conductivité thermique des matériaux doit être faible également afin que le gradient de température soit significatif. L'optimisation de ces paramètres peut être formalisée en introduisant le facteur de mérite [3] de chacun des deux matériaux constituant le thermocouple sous la forme :

$$Z = \frac{\sigma \cdot \alpha^2}{\lambda_{th}} (\text{°C}^{-1}) \quad (1)$$

avec  $\alpha$  : pouvoir thermoélectrique ( $\mu\text{V/K}$ ).

$\lambda$  : conductivité thermique ( $\text{W/mK}$ )

$\sigma$  : conductivité électrique ( $\Omega^{-1}\text{m}$ )

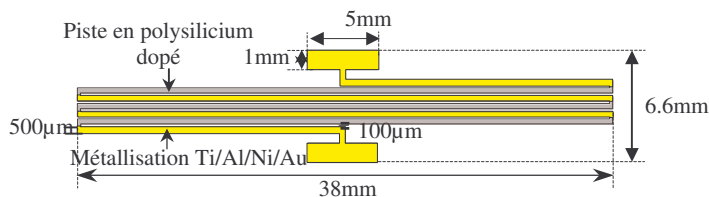
Dans le cas de microcapteurs réalisés en technologie silicium, le matériau utilisé est le polysilicium et les seuls paramètres ajustables sont le type de dopant et la dose implantée. En conséquence les grandeurs qui pourront être modifiées de façon significative sont le coefficient de Seebeck (ou pouvoir thermoélectrique) et la conductivité électrique. La conductivité thermique du matériau ( $\lambda$ ) varie également avec la température, mais une telle étude nécessite un équipement très complexe en cours de mise au point.

Dans le cadre de cette communication, nous présenterons les résultats de l'étude, en fonction de la température, du pouvoir thermoélectrique des matériaux utilisés pour réaliser la thermopile. De nombreuses

thermopiles constituées de polysilicium dopé Bore ou Phosphore ont été réalisées pour différentes valeurs de dopages. La mise en œuvre de cette étude a nécessité la réalisation d'un dispositif spécifique adapté à la mesure haute température (jusqu'à 450 °C).

## 2 ETUDE DU POUVOIR THERMOELECTRIQUE

Pour caractériser le pouvoir thermoélectrique, une thermopile de test a été réalisée [4], [5] sur un substrat rectangulaire de grande dimension afin de permettre une bonne isolation thermique entre les jonctions (cf. figure 1). La thermopile est constituée de trois thermocouples plaqués dont les jonctions sont situées aux extrémités du substrat. L'utilisation d'un couple métal-semiconducteur permet de déterminer séparément les coefficients Seebeck du polysilicium dopé N et du polysilicium dopé P. Le pouvoir thermoélectrique du métal utilisé (or) est négligeable par rapport à celui du polysilicium dopé (< à 1%)

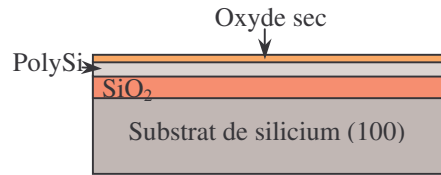


**Figure 1 :** Schéma de la cellule thermoélectrique de mesure du pouvoir thermoélectrique

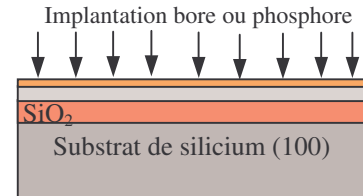
### 2.1 Procédé de fabrication des thermopiles sur substrat NID (100)

Tout d'abord une couche de 1µm d'oxyde thermique humide est déposée pour assurer l'isolation électrique entre le substrat et la thermopile. Puis, un dépôt de polysilicium de 4500Å d'épaisseur est effectué et enfin une couche de 500 Å d'oxyde sec est déposée sur le tout pour éviter l'exo diffusion des espèces implantées lors du recuit d'activation. L'implantation optimisée à l'aide du logiciel SRIM est effectuée à travers cette couche d'oxyde qui est ensuite enlevée dans un bain d'acide fluorhydrique.

Le polysilicium est gravé par RIE à base de gaz fluorés, le SF<sub>6</sub> et le CF<sub>4</sub> sous basse pression de 50 mTorr et une puissance de 50 W, afin de réaliser la piste thermoélectrique. Puis, une piste sur deux est métallisée afin de former un contact ohmique optimisé Ti (100A°) / Al(1500A°) / Ni(400A°) / Au(1000A°). La température de recuit choisie à 550 °C se situe près de l'eutectique Al/Si (577°C) [6]. L'ensemble est isolé à l'aide d'une couche de 1 µm de nitrure PECVD ( figure 2).



1- Croissance de l'oxyde thermique 1µm, dépôt de 4500Å de polysilicium et dépôt de 500 Å d'oxyde sec



2- Implantation et recuit d'activation



3- Gravure RIE de la piste de polysilicium et dépôt métallique Ti(100A°)/Al(1500A°)/Ni(400A°)/Au(1000A°)



4- Dépôt de 1000Å de nitrure PECVD et gravure RIE des plots de contacts

**Figure 2 :** Etapes de fabrication des thermopiles de test en microtechnologies

### 2.2 Dispositif de caractérisation du pouvoir thermoélectrique en haute température (jusqu'à 450 °C)

Le dispositif de caractérisation a été réalisé sur une plaque en céramique (figure 3) de conductivité thermique faible (1W/m.K) usinée mécaniquement. Un élément chauffant constitué d'une résistance insérée à l'une des extrémités du dispositif permet d'élever la température des jonctions de la thermopile disposée à proximité. Deux thermocouples type K sont utilisés pour mesurer les températures sous les 2 zones de jonctions (figure 4). Ce système est disposé dans un four régulé en température afin de pouvoir ajuster la température moyenne de la thermopile indépendamment de la différence de température entre les jonctions ( $\Delta T$ ). La tension générée par la thermopile ( $V_{Sbk}$ ) est mesurée à l'aide d'un microvoltmètre et le pouvoir thermoélectrique  $\alpha$  déduit à partir de la relation suivante :

$$\alpha = \frac{V S b k}{N \cdot \Delta T} \quad (2)$$

avec N : Nombre de thermocouples PolySi/Au

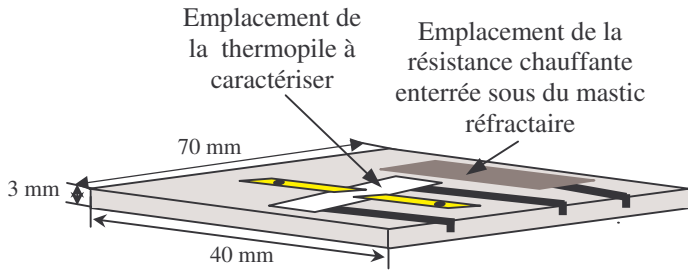


Figure 3 : Schéma et dimensions de la céramique usinée avec les plots de connexion

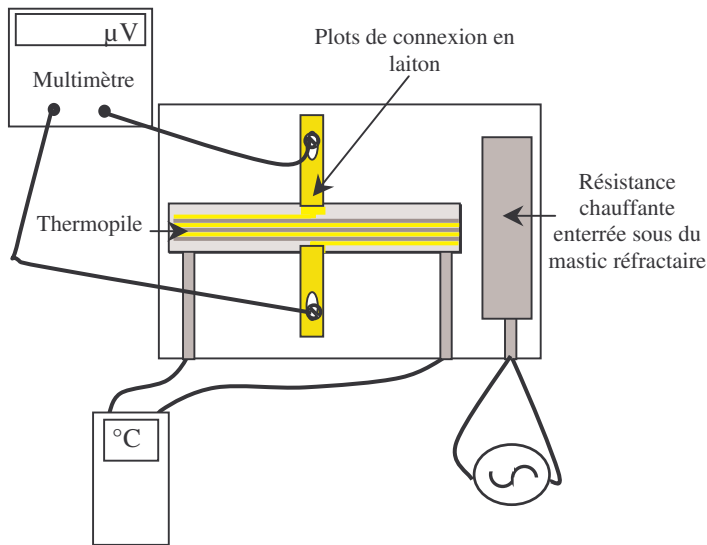


Figure 4 : Représentation du banc de caractérisation du pouvoir thermoélectrique

### 2.3 Résultats obtenus

Les figures 5 et 6 représentent les évolutions du pouvoir thermoélectrique du polysilicium dopé bore et phosphore en fonction de la dose implantée dans une gamme de température allant de 20-450°C

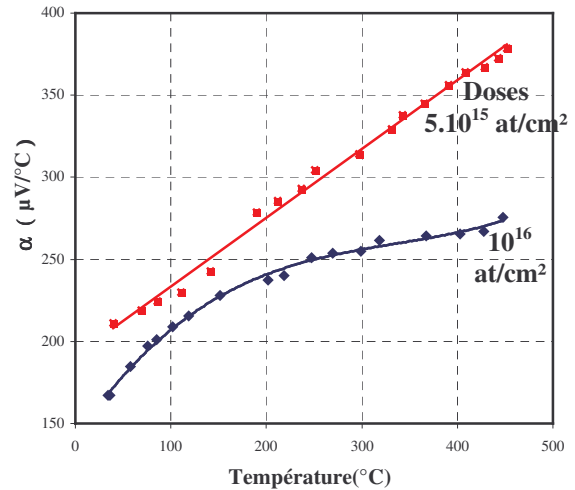


Figure 5 : Evolution du pouvoir thermoélectrique du Polysilicium dopé bore en fonction de la température

Par convention, le pouvoir thermoélectrique du polysilicium type N est négatif alors que celui du type P est positif. De plus, il faut que les coefficients de température de ces pouvoirs thermoélectriques soient de signes opposés. Ceci montre qu'il est donc possible de réaliser des thermopiles compensées en température en associant du polysilicium type N et du polysilicium type P pour former un thermocouple présentant un pouvoir thermoélectrique important.

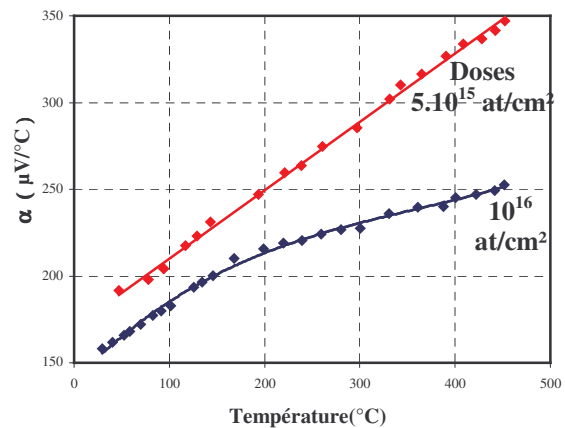
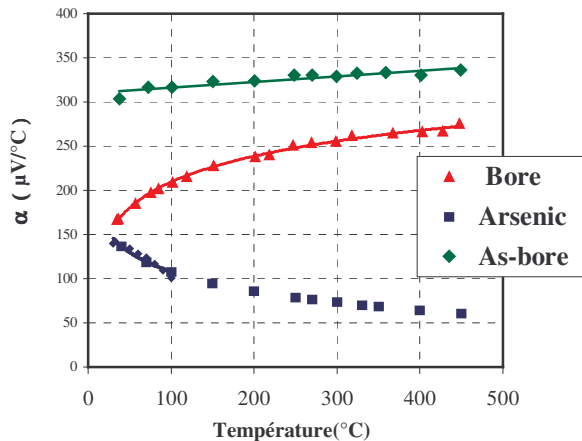


Figure 6 : Evolution du pouvoir thermoélectrique du polysilicium dopé phosphore en fonction de la température

Des thermopiles dopées bore et phosphore compensées en température ne peuvent être réalisées car les coefficients de température correspondants sont tous deux positifs.

Par contre un dopage à l'arsenic à 10<sup>16</sup> at/cm<sup>2</sup> donne un coefficient de température négatif. Une thermopile compensée en température peut donc être obtenue en associant des zones de polysilicium dopées bore et arsenic. La courbe correspondante est représentée sur la figure 7.



**Figure 7 :** Evolution du pouvoir thermoélectrique du polysilicium dopé arsenic et bore (dose  $10^{16}$  at/cm<sup>2</sup>) en fonction de la température

### 3 CONCLUSION

Cette étude nous a permis de quantifier l'évolution du pouvoir thermoélectrique du polysilicium dopé bore ou phosphore en fonction de la température dans la gamme 100-450 °C, la gamme 20–100 °C ayant été explorée dans le cadre de travaux antérieurs [7].

Le pouvoir thermoélectrique augmente de façon continue avec la température quel que soit le dopage choisi. Par ailleurs, il faut remarquer que pour obtenir un coefficient de Seebeck important, il faut doper très faiblement mais dans ce cas la résistance électrique du thermocouple augmente, ce qui est source de bruit.

L'association de pistes de polysilicium dopé bore et arsenic à  $10^{16}$  at/cm<sup>2</sup> reliés par un contact ohmique permet de réaliser des thermopiles dont le coefficient de Seebeck est quasi-constant dans la gamme 20-450 °C.

### BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. W. Van Herwaarden, P. M. Sarro, "Thermal sensors based on Seebeck effect". Sensors and Actuators, Vol.10, p. 321-346(1986)
- [2] M. Von Arx, O. Paul, "Test structures to measure the Seebeck coefficient of CMOS IC polysilicon". IEEE Transactions On Semiconductor Manufacturing, Vol. 10, N° 2, p. 201-208(1997)
- [3] A. F. Ioffe, "Semi conductor thermoelements and thermoelectrics cooling". Infosearch, London, 1957.
- [4] M. Boutchich, "Microcapteurs de rayonnement infrarouge en technologie silicium". Thèse de doctorat USTL, décembre 2002
- [5] S. Sakly, "Etude et réalisation de microcapteurs radiatifs infrarouges en technologies couches minces à structure distribuée périodique". Thèse de doctorat USTL, juin 1998
- [6] D.H.StJohn, A.K. Dahle, M.A. Easton, J.E.C. Hutt and N.L.M. Veldman, "Solidification of Hypoeutectic Aluminium-Silicon Alloys". Materials forum (1999), p. 137-152

[7] M. Boutchich, K. Ziouche, P. Godts, D. Leclercq, "Characterization of phosphorus and boron heavily doped LPCVD polysilicon films in the temperature range 293-373K". IEE Electronic Device Letter, Vol. 23, N°3, p. 139-141(2002)