

Mesure de température sans contact dans un environnement sale

Katir ZIOUCHE*, Malika YALA, Mehdi HAFFAR, Pascale GODTS, Didier LECLERCQ

Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologies
Avenue Poincaré, cité Scientifique, Université des Sciences et Technologies de Lille
59650 Villeneuve d'Ascq

* Katir.ziouche@iemn.univ-lille1.fr

Résumé - Dans cet article, une nouvelle méthode de mesure de température sans contact restant opérationnelle en milieu sale est décrite. Elle met en œuvre un microfluxmètre [1,2] réalisé en technologie couche mince silicium de dimension 5x5 mm², recouvert d'un absorbant IR. Ce capteur thermique décrit par la suite permet la mesure simultanée de sa température de surface et de l'énergie radiative émise par la cible. Ces deux grandeurs sont nécessaires pour déduire la température T_{Cible} . En milieu propre, une thermopile standard avec une fenêtre IR se montre plus performante car insensible à la convection. Par contre, nous montrons qu'en salissant les 2 capteurs, le microfluxmètre conserve les mêmes performances alors que la thermopile ne fonctionne plus. La mesure de la température avec cette méthode est précise à $\pm 2\%$.

Nomenclature

a	absorptivité	S_E	sensibilité à l'éclairement, $V.m^2.W^{-1}$
α	pouvoir thermoélectrique, $V.K^{-1}$	σ_0	constante de Stefan-Boltzmann, $W.m^{-2}.K^{-4}$
C_{Ta}	sensibilité à l'air, $V.K^{-1}$	R	résistance électrique, Ω
ε	émissivité	θ	température, $^{\circ}C$
E	éclairage énergétique, $W.m^{-2}$	T	température, K
F_{cp}	facteur de forme	V	tension électrique, V
λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$		

1. Introduction

Mesurer une température sans contact est nécessaire pour de nombreuses applications et s'avère très difficile à réaliser dans un environnement sale. De manière générale, les capteurs utilisés pour ce type de mesure de la température [3] sont trop sensibles à la convection et nécessite une encapsulation qui les rend inopérants lorsque la fenêtre IR du boîtier est sale.

Le capteur de flux total [1] utilisé est recouvert d'un absorbant IR (polyimide : absorptivité proche de 1). L'énergie radiative émise par un corps chaud (cible), situé à proximité, est absorbée par le polyimide et transformée en flux de chaleur. Ce flux, du fait de la configuration dissymétrique du capteur, génère des gradients thermiques tangentiels détectés à l'aide d'une thermopile disposée à la surface du capteur. La tension alors délivrée est une fonction linéaire du flux net échangé entre le capteur et le corps dont on souhaite mesurer la température. Une sonde platine Pt₁₀₀₀ réalisée en couche mince au cœur du dispositif donne une indication précise de la température superficielle du capteur. Il est alors possible de déduire de ces deux mesures la température de la cible : le flux net échangé étant proportionnel à la différence des puissances quatrièmes des températures de la cible et du capteur. La salissure éventuelle du capteur n'ayant pratiquement aucune influence sur l'absorptivité maximale du revêtement absorbant, celle-ci n'influe en rien sur la sensibilité du

capteur et par suite sur la mesure de la température de la cible. Le capteur étant un fluxmètre total, les limites de la méthode et les précautions à prendre pour minimiser l'influence de la convection et de la conduction gazeuse seront également données.

2. Réalisation du fluxmètre et principe de fonctionnement

Le fluxmètre est fabriqué sur substrat silicium dans lequel ont été réalisés, par masquage, des caissons de silicium mesoporeux par anodisation à l'aide d'une attaque électrochimique à base d'une solution d'acide fluorhydrique et d'éthanol [4]. Cette gravure sélective permet de générer des discontinuités thermiques dues à la différence de conductivité thermique entre le silicium ($\lambda_{Si} = 140 \text{ W/m.K}$) et le silicium poreux ($\lambda_{Si \text{ poreux oxydé}} = 1.2 \text{ W/m.K}$) [5]. Un traitement thermique permet d'assurer d'une part une bonne oxydation du silicium poreux afin de diminuer sa conductivité thermique mais aussi et surtout lui garantir une bonne tenue mécanique.

Par suite, une couche de $0.1\mu\text{m}$ de Si_3N_4 LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) à faible contrainte est déposée pour assurer l'isolation électrique avec la thermopile. Celle-ci est réalisée à l'aide d'une couche de $0.5 \mu\text{m}$ de polysilicium. Les thermoéléments sont réalisés avec une implantation Bore ($1.10^{16} \text{ at/cm}^2$, 70 KeV) et une implantation Phosphore ($1.10^{16} \text{ at/cm}^2$, 180 KeV). Une résistance de platine Pt_{1000} est réalisée au cœur de la thermopile à l'aide d'un dépôt par évaporation d'une couche de 1500 \AA de Pt.

La couche superficielle est déposée à la tournette. Elle permet de passiver le capteur tout en profitant des propriétés électriques, thermiques et absorbantes du polyimide.

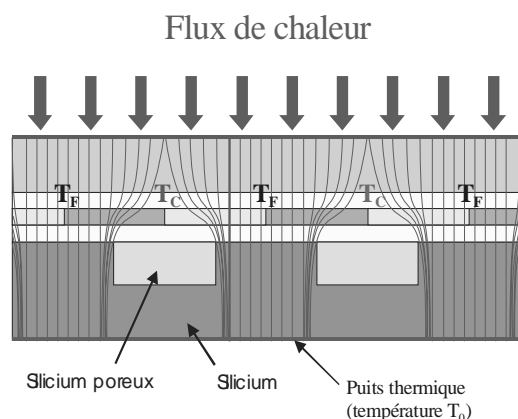


Figure 1 : Déviation des lignes de flux thermique

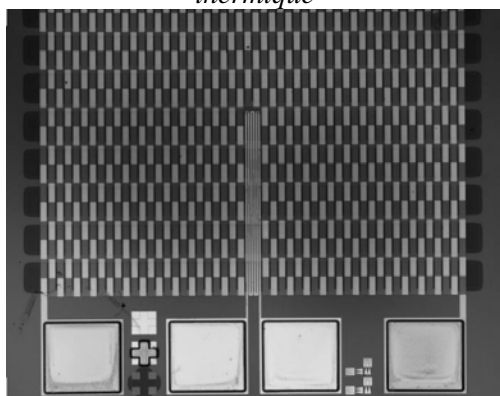


Figure 2 : Fluxmètre et sonde platine

Le fonctionnement du fluxmètre repose sur un principe consistant en la déflexion des lignes de flux thermique traversant le capteur. Les déviations permettent d'engendrer localement des gradients thermiques tangentiels périodiques qu'il est alors possible de détecter à l'aide d'une thermopile constituée par l'association en série d'un grand nombre de thermocouples (thermoéléments en polysilicium N et P dont le pouvoir thermoélectrique global, $\alpha = 300 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$, est compensé de telle façon qu'il n'y ait pas de dérive en fonction de la température [6]). La disposition de cette thermopile permet de multiplier et mettre en série les jonctions tangentielles. La f.e.m. mesurée est alors une fonction linéaire du flux qui traverse le fluxmètre. L'originalité du concept repose sur les dissymétries thermiques créées dans le substrat, dues à des contrastes de résistance thermique générés par la réalisation de caissons de silicium poreux dans un wafer de silicium comme le montre la photo ci-dessous (figure 1) [7].

L'énergie radiative incidente est absorbée par le revêtement superficiel du capteur constitué d'une couche de $10\mu\text{m}$ de polyimide d'absorptivité connue $a = 0.95$ [8].

3. Caractérisation

Le capteur réalisé est un fluxmètre total sensible à la convection, à la conduction gazeuse et à la radiation. Il est facile de minimiser la sensibilité à la grandeur parasite qu'est la convection en disposant le capteur dans un boîtier sans fenêtre permettant de considérablement réduire l'influence convective. Néanmoins dans de nombreuses configurations expérimentales, la température du capteur et l'air environnant seront susceptibles de varier fortement et il est donc essentiel d'évaluer ces phénomènes.

C'est pourquoi le dispositif de caractérisation mis en oeuvre permet la détermination de la sensibilité à l'éclairement (S_E) ainsi que la sensibilité à la température d'air C_{Ta} du fluxmètre.

Le capteur est collé sur une plaque contrôlée en température à l'aide d'un ultra-thermostat associé à un circuit de circulation d'eau. La cible qui fait face au microcapteur est constituée d'une plaque chauffante couverte d'un revêtement noir d'émissivité $\varepsilon = 0.97$ pilotée par un régulateur PID (figure 3).

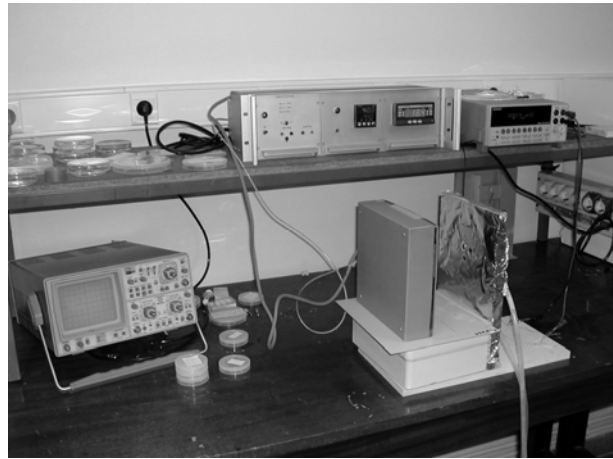
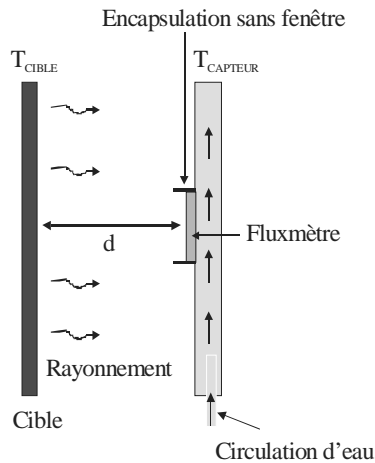


Figure 3: Photographie et schéma du banc de caractérisation du capteur

L'expression de la tension délivrée par le capteur a été établie dans le cadre de travaux antérieurs [9] et est donnée par l'équation 1. La température du capteur T_{Capteur} est quasiment la même que celle de la plaque support refroidie.

$$V = S_E \cdot (E - \sigma_0 \cdot T_{\text{Capteur}}^4) + C_{Ta} \cdot (T_{\text{air}} - T_{\text{Capteur}}) \quad (1)$$

$$\text{avec } \sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^4$$

Cette relation est constituée d'un terme représentatif de la composante radiative où E représente l'éclairement du capteur et S_E sa sensibilité à l'éclairement. Le second terme traduit l'influence, néfaste, de la différence entre la température de l'air environnant (T_{air}) et celle du capteur, avec un coefficient de proportionnalité C_{Ta} .

Il apparaît que pour mesurer la sensibilité S_E , il est nécessaire de réaliser la condition $T_{\text{air}} = T_{\text{Capteur}}$, c'est-à-dire faire en sorte que l'air circulant autour du capteur soit à la même température (proche de 20°C) que la plaque servant de support. En pratique, c'est la cible qui est la cause de l'échauffement de l'air environnant le capteur, il faut donc l'éloigner afin de minimiser son influence.

Il est alors essentiel d'évaluer la distance critique à partir de laquelle le signal induit par la température d'air devient négligeable par rapport à la composante radiative. Pour ce faire,

nous avons relevé la tension délivrée par le microcapteur en faisant varier la distance d entre la cible portée à 70°C et le capteur (figure 4).

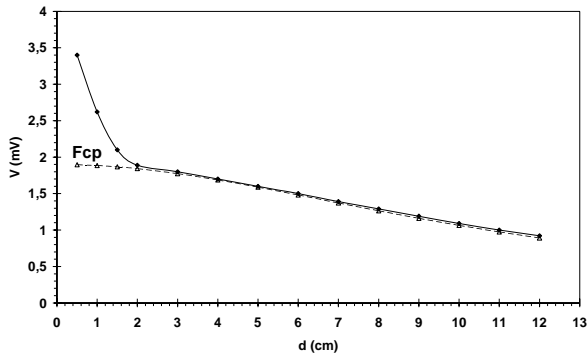


Figure 4 : Tension délivrée par le capteur en fonction de sa distance à la cible et facteur de forme correspondant

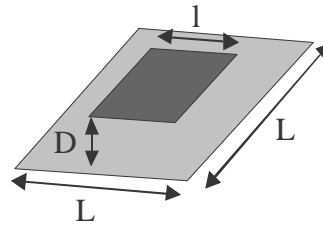


Figure 5 : Facteur de forme F_{cp}

$$F_{cp} = \frac{1}{1 + \xi \cdot D^2} \quad (2)$$

Expression valide pour $l \leq L/5$

$$\left(\text{avec } \xi = \frac{\pi}{\text{Surface}_{\text{CIBLE}}} \right)$$

On note un net changement d'allure de la courbe (figure 4) en deçà de 2 cm qui se révèle être la distance critique. Dans cette zone, à la tension d'origine radiative s'ajoute une tension due aux phénomènes de conduction gazeuse dans la lame d'air séparant le capteur de la cible [10].

Au-delà de cette distance, il n'y a plus influence totale entre le capteur et la cible et il est indispensable de prendre en compte l'effet de la distance de la cible sur l'éclairement reçu par le capteur. Ce phénomène a été étudié dans le cadre d'une thèse de doctorat effectuée au laboratoire [11], et se traduit par un facteur de forme F_{cp} (équation 2) qui tient compte des différents facteurs de formes existant d'une part entre la cible et le capteur et d'autre part entre la plaque supportant le capteur et la cible (cette expression approchée du facteur de forme F_{cp} dans le cas d'un échange entre le capteur et une source de dimension importante est précise à $\pm 5\%$ [11]).

En superposant le tracé de la tension à celui du facteur de forme, on constate qu'il est possible d'ajuster les courbes au-delà de la distance critique de 2 cm, ce qui prouve bien que dans cet espace, seule intervient la réponse à l'éclairement.

La tension délivrée par le capteur est relevée en fonction de l'éclairement énergétique E pour une distance $d = 2.5$ cm ($F_{cp} = 0.95$).

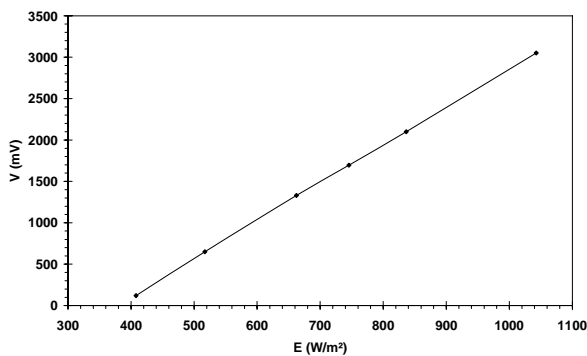


Figure 6 : Tension délivrée en fonction de l'éclairement énergétique (cible à 2.5cm)

La valeur de l'éclairement énergétique E est donnée par [12] :

$$E = 0.95 \cdot \sigma_0 \cdot T_{\text{Cible}}^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (3)$$

La sensibilité à l'éclairement énergétique du capteur est déduite de la pente de la courbe obtenue (figure 6) :

$$S_E = \left(\frac{\partial V}{\partial E} \right)_{T_c = \text{cste}} = 4.6 \mu\text{V}/(\text{W/m}^2) \quad (4)$$

Dans ces conditions, lorsque le capteur est en quasi influence totale, il est possible de déterminer la température de la plaque cible. La température T_{Capteur} étant déterminée avec précision à l'aide de la Pt₁₀₀₀ intégrée au cœur du capteur. Celle-ci réalisée en couche mince a été étalonnée au laboratoire : $R(\theta) = 1014.(1 + 3.1.10^{-3}.\theta)$.

Les équations (1 et 3) permettent de déduire la température T_{Cible} à partir de la tension délivrée par le capteur :

$$T_{\text{Cible}} = \sqrt[4]{\frac{1}{0.95\sigma_0} \frac{V}{S_E} + T_{\text{Capteur}}^4} \quad (5)$$

L'avantage de ce capteur est que contrairement aux autres capteurs, son revêtement supérieur d'absorptivité proche de 1 ne change pas lorsqu'il est sali. De ce fait le capteur permet de mesurer avec une précision (de l'ordre de 2%) la température d'une cible.

Le tableau ci-dessous résume un comparatif entre les mesures obtenues avec notre capteur et un capteur infrarouge industriel encapsulé, lorsque ceux-ci sont disposés face à la cible portée à 100°C selon qu'ils soient sales ou non. Il permet d'observer le bon fonctionnement de notre capteur quelque soit les conditions environnementales.

Température mesurée	Capteur IEMN	Capteur industriel
Avant salissure	98 °C	99 °C
Après salissure (graisse + graphite)	99 °C	38 °C
Erreur	< 5 %	> 60%

Tableau 1 : Mesure de la température d'une cible portée à 100°C (Selon salissure des capteurs)

4. Exemple d'application

Dans cette application, notre capteur a été intégré dans un dispositif chauffe ballon afin de mesurer la température de l'eau, figure 7. L'intégration du capteur a été effectuée de sorte que celui-ci se trouve dans des conditions d'influence quasi-totale face au ballon d'eau, à une distance de 3 cm. Le capteur n'étant pas refroidi, il s'échauffe jusqu'à atteindre à l'équilibre une température proche de celle de l'air l'entourant.

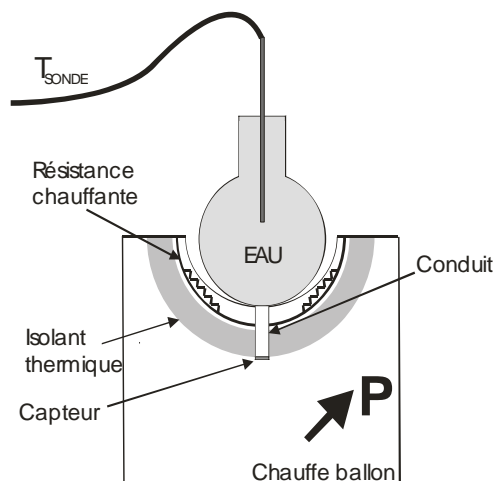


Figure 7 : Intégration dans un Chauffe ballon

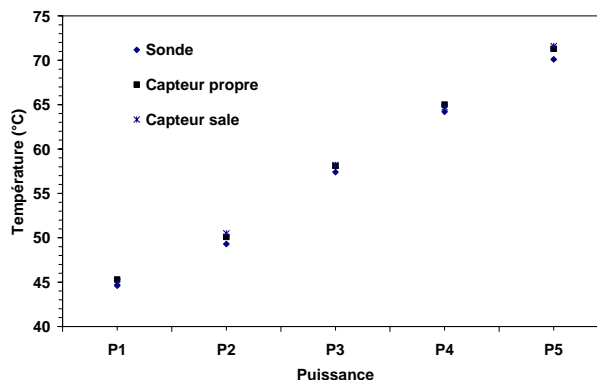


Figure 8 : Température de l'eau mesurée pour différente puissance dans le chauffe ballon

La disposition du capteur au fond d'un petit conduit réalisé à sa dimension permet de minimiser les phénomènes conductifs. Ce conduit est recouvert d'un revêtement d'absorptivité proche de l'unité assurant une indépendance à la saleté du facteur de forme de l'ensemble.

Les mesures de température obtenues avec le microfluxmètre sont comparées avec la température relevée directement à l'aide d'une sonde de thermomètre de précision (0.01°C) directement plongée dans l'eau. La figure 8 donne les températures mesurées par le capteur pour différentes puissances de chauffe. Celles-ci sont comparées à celles indiquées par la sonde immergée. Nous pouvons constater une bonne concordance des résultats avec dans tous les cas un écart de mesure inférieur à 2%, même lorsque le capteur est sali.

5. Conclusion

Dans cet article, la mesure de température sans contact dans un environnement sale a été décrite. Un fluxmètre thermique total recouvert d'un matériau d'absorptivité proche de l'unité a été mis en œuvre et utilisé. Compte tenu de son procédé de fabrication, il est destiné à être produit en grandes quantités et à faible coût afin de permettre son utilisation dans le domaine grand public tel que l'électroménager, la domotique et l'automobile. Un exemple d'intégration dans un dispositif commercial a d'ailleurs permis de démontrer la faisabilité avec de bons résultats dont une précision de l'ordre de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ($< 2\%$).

Références

- [1] K.Ziouche, P.Godts, D. Leclercq, Microcapteur de flux thermique en technologie Silicium, *SFT 2006 (île de ré, 16-19 mai 2006)*
- [2] K. Ziouche, M. Yala, M. Haffar, P. Godts, D. Leclercq, *A new thermal flux microsensor realized in silicon technology. Paper submitted to the Applied Physics Journal (2006)*
- [3] R. Lenggenhager, H. Baltes, J. Peer, M. Forster, Thermoelectric infrared sensors by CMOS technology, *IEEE Electron Device Letter*, Vol. 13, NO. 9, (1992)
- [4] S.D. Campbell, L.A. Jones, E. Nakamichi, F.X. Wei, L.D. Zajchowki, Spectral and structural features of porous silicon prepared by chemical and electrochemical etching processes, *J. Vac. Technol. B*, 1995, Vol 13, 1184-1189
- [5] I.V. Blonskij, M.S. Brodyn, V.A. Tkhoryk, A.G. Filin, J.P. Piryatinskij, The photo acoustic effect in porous silicon : peculiarities of its manifestation and its application to the investigation of optical and thermal properties of materials, *Semicon. Sci. Technol*, 1997, Vol 12, 11-18
- [6] M. Boutchich, K. Ziouche, P. Godts, D. Leclercq, Characterisation of Phosphorus and Boron heavily doped LPCVD polysilicon films in the temperature range 293-373K. *IEEE Electron device letters*, Vol. 23., n°3, (March 2002)
- [7] K.Ziouche, P.Godts, D. Leclercq, *Microcapteur de flux thermique sur substrat conducteur notamment silicium*, International patent, (2006).
- [8] K.Ziouche, P.Godts, D. Leclercq, Polyimide resists as infrared absorbing layers for radiation microsensors, *Sensors and Materials*, Vol. 12, n°8, 445-154, (MY Tokyo 2000)
- [9] M. Boutchich, *Microcapteurs de rayonnement infrarouge en technologie silicium*, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille (décembre 2002)
- [10] A.B. De Vriendt, *La transmission de la chaleur, introduction au rayonnement thermique*, 198-202, Gaëtan Morin éditeur, 1992, Québec
- [11] F. Pollet, *Etudes théoriques et expérimentales de la radiométrie par absorption différentielle distribuée appliquée au contrôle de température sans contact*, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille (1999)
- [12] H.Randrianarisao, *Etude et réalisation d'un banc de mesures pour capteurs de rayonnement infrarouge. Application à la caractérisation de microradiomètres*, Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille (décembre 1998)