

Mesure de la température locale de composants micrométriques par une méthode radiométrique à courte longueur d'onde

Sonia DHOKKAR^{1*}, Patrick LAGONOTTE¹, Catherine FUENTES¹, André PITEAU¹,
Bruno SERIO², Bernard CRETIN³

¹Laboratoire d'Etudes Thermiques, E.N.S.M.A., 1, avenue Clément ADER, BP 40109, F-86961 FUTUROSCOPE Cedex.

²Laboratoire des Systèmes Photoniques, E.N.S.P.S., boulevard Sébastien BRANT, BP 10413, F-67412 ILLKIRCH Cedex.

³Institut FEMTO-ST/C.N.R.S, Département LPMO, 32, avenue de l'Observatoire, F-25044 BESANÇON Cedex.

* (auteur correspondant : sonia.dhokkar@let.ensma.fr)

Résumé - Pour garantir la fiabilité des composants électroniques, il est important d'évaluer expérimentalement l'évolution de leur température locale au niveau du semi-conducteur. Dans ce travail, nous présentons un montage expérimental basé sur une méthode de mesure non destructive et non intrusive permettant de déterminer la température locale de la surface d'un composant à l'échelle micrométrique. Après une description détaillée du montage, les premiers résultats obtenus sont analysés et discutés. En particulier, l'excellente résolution spatiale optique du dispositif expérimental et sa grande sensibilité à la détection de faibles variations de température sont mises en évidence.

Nomenclature

T	température, K	L^0	Luminance, $W.\mu m^{-3}.Sr^{-1}$
NEP	Puissance équivalente de bruit, $W.Hz^{-0,5}$		
T_f	Température de fond thermique, K		<i>Symboles grecs</i>
T_{atm}	Température atmosphériques, K	λ	Longueur d'onde, μm
T_a	Températures radiatives, K	τ	Coefficient de transmission atmosphérique
PIR	Proche infrarouge	λ_{max}	Longueur d'onde d'émission maximum, μm
O.N.	Ouverture numérique d'un objectif	ε	Emissivité thermique
B	Bande de bruit, $[Hz]$	ϕ	Densité du flux de chaleur, $W.m^{-2}$

1. Introduction

La thermographie infrarouge est une technique largement utilisée permettant la détermination de la température absolue d'un objet. Cette mesure de température absolue est basée sur la loi de rayonnement du corps noir (loi de Planck). Toutes les caméras thermiques usuelles sont sensibles dans les bandes spectrales de 3-5 μm ou de 8-13 μm dans le but de détecter le maximum de flux émis dans la bande infrarouge (4,5 à 30 μm) qui contient 90% de l'énergie rayonnée par un corps noir à 600 K. En effet, la loi de déplacement de Wien (1) montre que la longueur d'onde d'émission maximum du rayonnement pour la gamme de température 300-3000 K reste dans la bande 1 μm à 10 μm (Figure 1). Ces grandes valeurs de longueur d'onde optimale obtenues à partir de la loi de Planck et la loi de déplacement de Wien limitent l'application de la méthode thermographique aux objets macroscopiques dont la taille est compatible avec le critère de Rayleigh.

Les appareils de thermographie classique ne peuvent pas être employés pour des mesures de la température des objets de la taille du micromètre. D'autre part, la loi de déplacement de Wien ne

tient pas compte de l'effet thermosensible et du rapport signal sur bruit du système de détection dont les valeurs augmentent fortement lorsque la longueur d'onde diminue. Différentes méthodes ont été développées pour résoudre ce problème [1-3] dont la technique de cristal liquide polarisée a été utilisée, pour l'évaluation qualitative de la température de l'objet, avec une résolution spatiale d'environ 1 μm [4, 5]. Cependant, cette méthode est destructive. La méthode de photo-réflexivité a été développée pour déterminer la température à cette échelle spatiale, mais celle-ci donne seulement une valeur relative de la température [6].

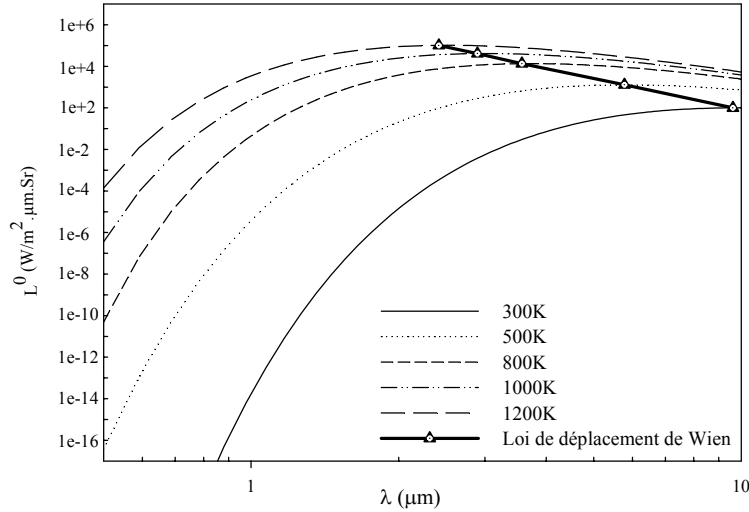


Figure 1 : Loi de distribution spectrale de Planck et loi de déplacement de Wien

Selon le critère de Rayleigh, le meilleur pouvoir séparateur qui peut être obtenu sur des composants de très faible échelle nécessite une bande spectrale inférieure à celle utilisée par thermographie infrarouge classique. La mesure de température absolue de composants micrométriques exige donc des méthodes radiométriques à courte longueur d'onde.

La détermination de la longueur d'onde optimale, permettant de réaliser des mesures de température locale à l'échelle du micron, est basée sur les travaux présentés dans [7]. Dans cette étude un critère d'optimisation (facteur de mérite (1)) prenant en compte la sensibilité du signal, issu du capteur photoélectrique, la variation de température et le flux effectivement rayonné par l'objet a été déterminé. Ce facteur de mérite (1) montre qu'un détecteur ayant une bande spectrale autour de 1,5 μm permet de mesurer la température de la surface d'un objet porté à 200°C.

$$\text{facteur de mérite : } Q_{(\lambda, T, T_f)} = \underbrace{\frac{dT}{dL^0(\lambda_{\max}, T)}}_{Q_1} * \underbrace{\frac{\pi \cdot L^0(\lambda, T) \cdot \lambda \cdot \Delta\lambda}{NEP(\lambda, T_f) \cdot \sqrt{B}}}_{Q_2} \quad (1)$$

Avec Q_1 l'accroissement de sensibilité en fonction de la longueur d'onde, et Q_2 le rapport signal sur bruit dans le cas d'un rayonnement thermique du fond à T_f .

Le flux émis dans la bande spectrale PIR est très faible, cependant, cette faible émission est compensée par la très grande sensibilité des capteurs pour ces longueurs d'ondes. D'autre part, le proche infrarouge ($< 2 \mu\text{m}$) permet l'utilisation de composants optiques standards sans le surcoût lié à ceux du domaine IR. L'utilisation d'une méthode radiométrique dans la bande du proche infrarouge (0,9 μm à 1,7 μm) s'avère donc optimum par rapport à la valeur de la longueur d'onde d'émission dictée par la loi de Wien [8].

2. Le montage expérimental

2.1. Principe de fonctionnement

Le montage expérimental présenté dans ce travail a pour but d'effectuer des mesures de température absolue à l'échelle du micromètre en régime permanent et la détermination du comportement thermique d'un composant électronique en régime transitoire.

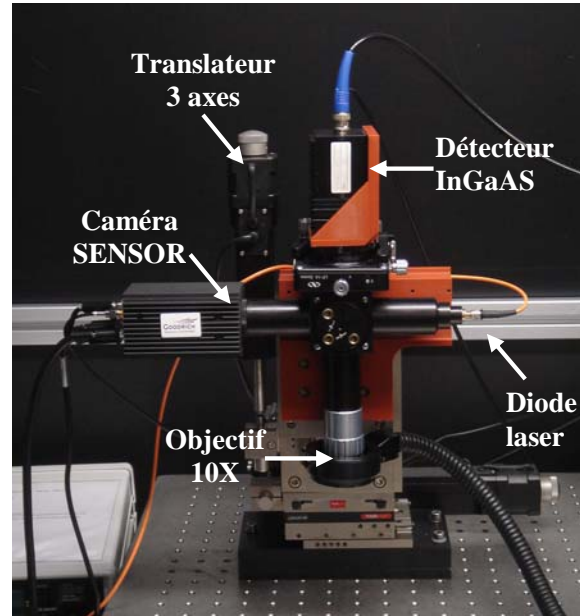
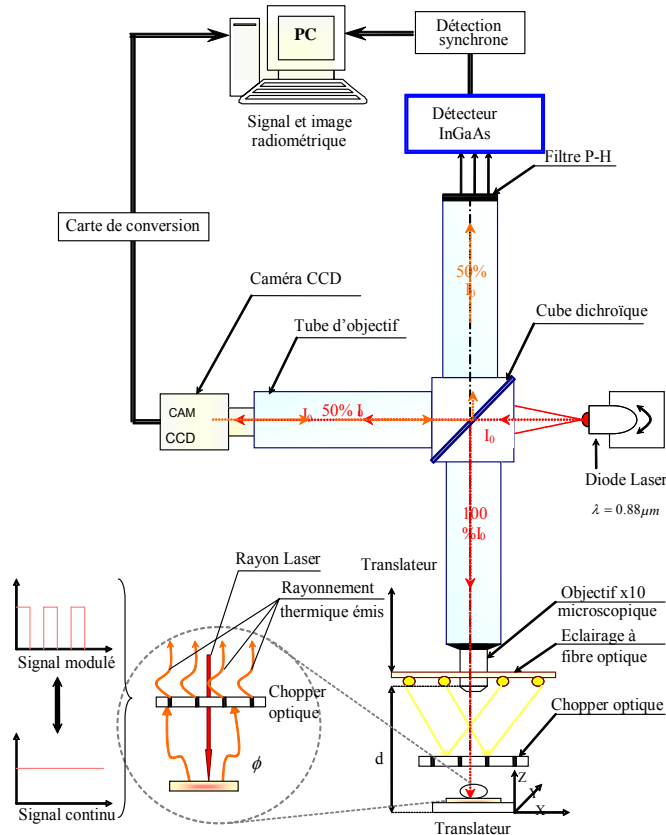


Figure 2 : Schéma synoptique le montage expérimental

- Le microscope thermique, développé dans cette étude, est basé sur l'association :
- d'une optique constituée d'un objectif, un tube de prolongation et un cube dichroïque nécessaire pour diviser le flux thermique entre une caméra et un détecteur mono-point.
 - d'une caméra CCD CCIR SENSOR de type InGaAs ayant une bande spectrale $[0,9-1,7 \mu\text{m}]$ et une fréquence vidéo de l'ordre de 50 Hz fonctionnant en mode non entrelacé. Elle comporte une matrice 320×240 pixels [9].
 - d'un détecteur mono-point en technologie InGaAs à grande bande passante (120 kHz). Ce capteur mono-point de chez Hamamatsu est constitué d'une photodiode refroidie à -15°C et d'un préamplificateur. Ce détecteur ayant une surface active de $0,7 \text{ mm}^2$ est sensible dans la même bande spectrale que celle de la caméra ($[0,9-1,7 \mu\text{m}]$). La bande passante ($[0-120 \text{ kHz}]$) du capteur mono-point, permet d'étudier le comportement thermique local des composants électroniques pendant un temps très court (allant jusqu'à $t = 10 \mu\text{s}$) [10].
 - d'une diode laser de très faible puissance est utilisée pour localiser sur l'image de la caméra la zone effectivement mesurée par le détecteur mono-point.

Cet assemblage constitue un microscope optique doté de trois axes micrométriques robotisés qui permet de se localiser sur la surface de l'objet à étudier (Figures 2). Pour ne pas être perturbées par la lumière ambiante visible, les mesures sont effectuées dans le noir, alors que les

réglages sont réalisés avec un éclairage dans le visible. La caméra est indispensable pour se repérer sur la surface du composant et pour focaliser l'image, car le capteur mono-point utilisé seul est aveugle. Ces deux instruments sont complémentaires et leur association permet le passage d'un comportement global moyen, obtenu par la caméra, au comportement local transitoire obtenu par le capteur mono-point. Le signal délivré par le capteur mono-point est traité à l'aide d'un détecteur synchrone. Un balayage d'une fenêtre temporelle de faible largeur permet de reconstruire le signal thermique en régime transitoire. La température du caisson noir est contrôlée pendant les mesures afin de réduire l'influence des perturbations externes.

2.2. Etalonnage de la caméra

L'équilibre radiatif de rayonnement reçu par un détecteur peut être calculé comme [11] :

$$L_{mesuré}(T) = \tau \varepsilon L^0(T) + \tau(1 - \varepsilon)L^0(T_a) + (1 - \tau)L^0(T_{atm}) \quad (3)$$

L'étalonnage de la température d'un système optique infrarouge est fait avec un corps noir [12]. Dans ce cas, le facteur d'émission est pris $\varepsilon = 1$ et le coefficient de transmission est pris égal à 1 pour une distance d'étalonnage standard. La valeur de la luminance monochromatique mesurée ($L_{mesuré}$) représente le thermo-signal reçu par la matrice de la caméra. Ce signal est codé sur 12 bits par l'intermédiaire d'une interface d'acquisition (frame grabber). La corrélation de l'équation (3) avec la loi de Planck, permet de déterminer la courbe d'étalonnage en température (4) de la caméra InGaAs [13]. Afin d'accéder à la température d'un objet, la prise en compte du facteur d'émissivité de la surface de l'objet est nécessaire.

$$T = \frac{B}{\ln \left(\frac{R}{\frac{L_{mesuré} - \tau(1 - \varepsilon)L^0(T_a) - (1 - \tau)L^0(T_{atm})}{\varepsilon\tau} - A} + F \right)} \quad (4)$$

2.3. Etalonnage du capteur mono-point

La sensibilité du détecteur mono-point est étudiée grâce aux mesures de sa réponse en fonction de la température. La procédure consiste à étudier le signal thermique issu d'un diaphragme placé devant l'ouverture de la cavité d'un corps noir ($\varepsilon_\lambda = 0,99$). Le détecteur est placé à une distance de 250 mm par rapport à l'objet visé. La température de la cavité du corps noir varie de 25°C à 500°C. La réponse du détecteur suit une loi logarithmique et le seuil de détection est très faible (de l'ordre de 75°C) (Figure 3). Deux corps noirs industriels ont été utilisés, l'un à basse température (<175°C), l'autre à plus haute température (<500°C). Ces résultats mettent en évidence la haute sensibilité de la photodiode InGaAs aux faibles variations de flux émis par le diaphragme dans la bande spectrale PIR $\lambda = 0,9-1,7 \mu\text{m}$.

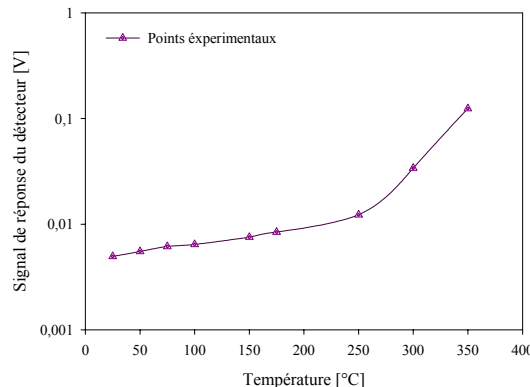


Figure 3 : Courbe d'étalonnage du détecteur mono-point InGaAs sur un corps noir

3. Validation expérimentale

Les microscopes optiques typiques ont une résolution d'environ $\lambda/2$ limitée par diffraction de la lumière. Une approximation de cette limite peut être calculée en utilisant le critère de Rayleigh :

$$d = \frac{0.62\lambda}{O.N.} \quad (5)$$

Où d est la séparation minimum entre des points à observer, λ la longueur d'onde de fonctionnement et O.N. l'ouverture numérique de l'objectif de microscope. Dans notre cas, le pouvoir séparateur est environ $2,4 \mu\text{m}$ selon le critère de Rayleigh ($O.N. = 0,4$ et $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$). Ce pouvoir séparateur nous permet de localiser les points chauds sur la puce en silicium et d'étudier son comportement en dynamique. Afin d'étudier le seuil de détection ainsi que la résolution spatiale du montage expérimental, une thermographie d'un fil en tungstène de $5 \mu\text{m}$ (figure 4) de diamètre a été réalisée (Figure 5). Le facteur d'émissivité du fil chaud, donné par le constructeur, est $\varepsilon = 0,5$. La figure 6 montre l'évolution du signal délivré par le capteur monopoint par rapport à la variation de température moyenne du filament contrôlée par un pont anémométrique à fil chaud régulant sa résistance et température. Ces mesures ont été réalisées en utilisant un objectif 10X.

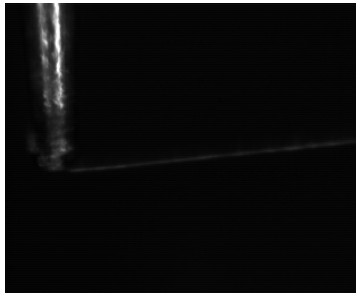


Figure 4 : Image optique du fil en tungstène de $5 \mu\text{m}$ (Grossissement 10X)

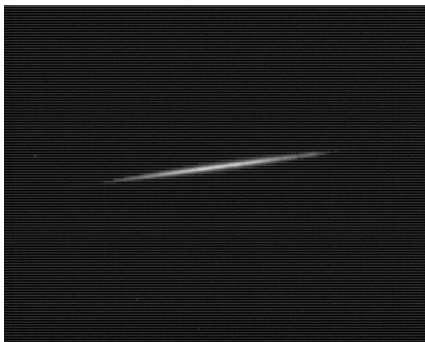


Figure 5 : Thermographie du fil en tungstène pour $T = 250^\circ\text{C}$

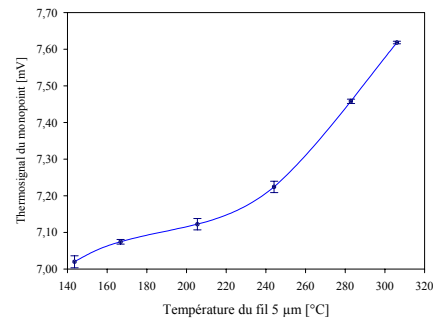


Figure 6 : Evolution du signal du capteur monopoint en fonction de la température du fil

La fiabilité des mesures effectuées par ce dispositif expérimental dépend fortement du facteur d'émissivité de la surface mesurée. Contrairement au fil chaud, les valeurs d'émissivité de différentes couches de matériau constituant le composant semi-conducteur ne peuvent pas être fournies par le constructeur. Pour cela, des investigations expérimentales ont été menées afin de déterminer les facteurs d'émissivité de ces semi-conducteurs. Le principe des mesures est basé sur la spectroscopie dans la bande spectrale proche infrarouge. Ces mesures ont été réalisées sur

la surface d'aluminium d'un wafer et sur la partie silicium après avoir enlever, par une attaque chimique, la couche de métallisation de la source d'un transistor.

4. Conclusion

Dans le but d'effectuer des mesures de la température de composants de très faible dimension, nous avons développé un microscope effectuant à la fois des micro-thermographies en régime statique avec une caméra à très haute sensibilité, et permettant de suivre l'évolution de la température en régime dynamique avec un détecteur mono-point en technologie InGaAs.

Ce travail met en évidence les capacités et les potentiels du montage développé. Ce montage montre que grâce à des capteurs très sensibles un faible seuil de détection en température peut être obtenu dans la bande spectrale (0,9 μm –1,7 μm), où le flux émis par l'objet observé est très faible. Les résultats obtenus sur un fil en tungstène de 5 μm de diamètre montrent la haute résolution du montage expérimental. D'autres thermographies avec des grossissements plus importants (20X) ont été réalisées et montre qu'il est possible d'améliorer la résolution spatiale obtenue par le montage expérimental tout en conservant son faible seuil de détection de température. L'application de cette méthode à la mesure de la température de composants d'électronique de puissance a débuté. Les premiers résultats obtenus en régime établi sont très satisfaisants. Les mesures de la température de transistors en régime transitoire sont en cours de réalisation. La validation de ces mesures nécessite un important travail de caractérisation des émissivités des matériaux constituant les composants électroniques (Aluminium, Silicium).

5. Références bibliographiques

- [1] P. Hervé, J. Sicard, M. Rzkotarisoa, « Pyrométrie dans l'ultra violet », SFT 1991, p. 139-142.
- [2] P. Herve, B. Serio, V. Pina, "Photothermométrie dans le domaine visible d'une scène à haute température en détection synchrone", Congrès THERMOGRAM 2003, Journées d'Etudes sur la Thermographie instrumentale et industrielle, (27 et 28 novembre 2003).
- [3] J.J. Hunsinger, O. Landemarre, B. Serio, P. Herve, "Détection par thermographie synchrone dans le visible de microfissures sur des revêtements céramiques élaborés par projection thermique", SFT 2005, p. 513-518, (Reims, 30 mai-2 juin 2005).
- [4] S. Ferrier, "Thermal and Optical Enhancements to Liquid Crystal Hot Spot Detection Methods", Proceedings of the 23rd International Symposium for Testing and Failure Analysis, ASM International, Materials Park, p.57, (1997).
- [5] K. Azar, J.R. Benson, V.P. Manno, "Liquid Crystal Imaging for Temperature Measurement of Electronic Devices", IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, Phoenix, p. 23-33, (1991).
- [6] S. Holé, G. Tessier, C. Filloy, D. Fournier, "Submicronic Thermal Imaging by Wavelength Multiplexed Photoreflectance Technique", *Electronics Letters*, Vol. 38, n°17, p. 986-987, (2002).
- [7] B. Sério, B. Cretin, "Thermographie par radiométrie à courte longueur d'onde", Congrès SFT 2003, Elsevier, p. 711-716, (Grenoble 3-6 juin 2003).
- [8] R. Patois, "Méthodes optiques et acoustiques pour les microscopies thermiques et thermo-élastiques aux échelles micro- et nanométriques", thèse doctorale à l'U.F.R des sciences et techniques, Franche-Comté, (juillet 2003).
- [9] SENSOR : www.sensorsinc.com
- [10] HAMAMATSU : www.hamamatsu.com
- [11] G. Gaussorgues, "La thermographie infrarouge Techniques et Documentation", Paris, 1981.
- [12] C. Bissieux, « Transfert thermique par rayonnement », Cours de DESS énergétique, université de Reims Champagne-Ardenne, (1999).
- [13] N. Horny, "FPA camera standardisation"; *Infrared Physics & Technology* n°44, (2003), p. 109–119.