



HAL
open science

Thermographie hétérodynée et thermoréfectance ponctuelle à haute résolution temporelle pour le diagnostic thermique de composants microélectroniques

Xabier Apaolaza, Fabrice Rigollet, Jérôme Adrian, Nathalie Ehret,
Jean-Laurent Gardarein, Pietro Fichera, Damien Barakel, Vincent Goubier

► To cite this version:

Xabier Apaolaza, Fabrice Rigollet, Jérôme Adrian, Nathalie Ehret, Jean-Laurent Gardarein, et al.. Thermographie hétérodynée et thermoréfectance ponctuelle à haute résolution temporelle pour le diagnostic thermique de composants microélectroniques. Congrès Français de Thermique 2017, IUSTI & les laboratoires de la fédération Fabri de Peiresec, Aix-Marseille Université, May 2017, Marseille, France. pp.691-698. hal-01795333

HAL Id: hal-01795333

<https://hal.science/hal-01795333>

Submitted on 18 May 2018

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.

Thermographie hétérodynée et thermoréfectance ponctuelle à haute résolution temporelle pour le diagnostic thermique de composants microélectroniques

Xabier APAOLAZA^{1*}, Fabrice RIGOLLET^{1*}, Jérôme ADRIAN², Nathalie EHRET¹, Jean-Laurent GARDAREIN¹, Pietro FICHERA², Damien BARAKEL³, Vincent GOUBIER².

¹Aix Marseille Univ, CNRS, IUSTI, Marseille, France

²STMicroelectronics ROUSSET, Zone Industrielle, 190 Avenue Coq, 13106 Rousset

³Aix Marseille Univ, Université de Toulon, CNRS, IM2NP, Marseille, France

* (auteurs correspondants : xabier.apaolaza@univ-amu.fr ; fabrice.rigollet@univ-amu.fr)

Résumé - Deux techniques sont utilisées en parallèle sur un même composant microélectronique pour diagnostiquer son échauffement au passage de pics de courant de quelques dizaines de microsecondes. La thermographie IR hétérodyne ‘full frame’ permet d’augmenter la résolution temporelle naturelle de la caméra d’un facteur 1000 (à 10 μ s). L’étalonnage est réalisé sur la scène (surface en aluminium avec couche de passivation). Le banc de thermoréfectance permet, lui, d’avoir un diagnostic sur un spot de 5 μ m de diamètre sur la zone d’intérêt, à 0,1 μ s de résolution temporelle. Les signaux obtenus sur la surface passivée sont cohérents avec l’IR mais nécessitent de poursuivre la phase d’étalonnage, plus complexe que sur une surface préalablement dorée.

Nomenclature

| | | | |
|-------------------|--|------------------|--|
| Δt_{cycl} | période d’excitation de la puce, s | R | réflectivité |
| Δt_{ech} | pas de temps naturel de la caméra IR, s | t_i | temps d’intégration de la caméra IR, s |
| Δt_{stro} | pas de temps d’hétérodynage, s | T | température, $^{\circ}C$ |
| I | courant photodiode TR ou dans la puce, A | <i>Acronymes</i> | |
| C_{TR} | Coeff. de Thermoreflectance, K^{-1} | IR | Infrarouge |
| | | TR | Thermoreflectance |

1. Introduction

Certaines défaillances de composants microélectroniques se produisent au cours de transitoires thermiques, au moment de la mise en fonction du composant qui engendre un brusque appel de courant. Les moyens d’analyse à mettre en œuvre afin d’assurer la fiabilité de ces produits nécessitent d’avoir la capacité d’étudier ces transitoires et leur impact sur la fonctionnalité électrique des circuits. Le défi majeur est donc ici de cartographier la température de la surface de composants, parfois peu émissifs, avec une résolution temporelle de l’ordre de 0,1 μ s, et une résolution spatiale de 5 μ m, pour des températures pouvant aller au maximum jusqu’à 400 $^{\circ}C$ a priori (résolution 1 $^{\circ}C$) [1-6]. Pour atteindre cet objectif, deux approches différentes ont été choisies sur un composant particulier. Après une présentation de ce composant choisi pour l’étude, la première méthode est exposée : elle consiste à utiliser une caméra infrarouge (IR) en mode hétérodyne pour améliorer la résolution temporelle (jusqu’à 10 μ s) et réaliser une cartographie permettant d’identifier une zone d’intérêt. Puis la seconde méthode est présentée, il s’agit cette fois de microscopie en thermoréfectance (TR), permettant une mesure locale sur la zone d’intérêt, permettant de gagner deux ordres de grandeur en résolution temporelle. Les problématiques de calibration de chacun des

dispositifs (toujours en cours) sont abordées. Enfin, les premières comparaisons très encourageantes des deux approches sont présentées, elles permettent d'annoncer avec une confiance raisonnable le niveau et la dynamique d'échauffement de la zone la plus chaude du composant dans ses premières microsecondes. Cette démarche croisée permettra à terme d'aider à positionner au mieux les mesures de température intégrées au composant.

2. Composant de microélectronique à analyser

Le dispositif à analyser (ou 'Device Under Test', DUT, en anglais) est un relais power MOS avec une protection de court-circuit intégrée Figure 1, qui est analysé en condition de surcharge, hors de son fonctionnement normal.

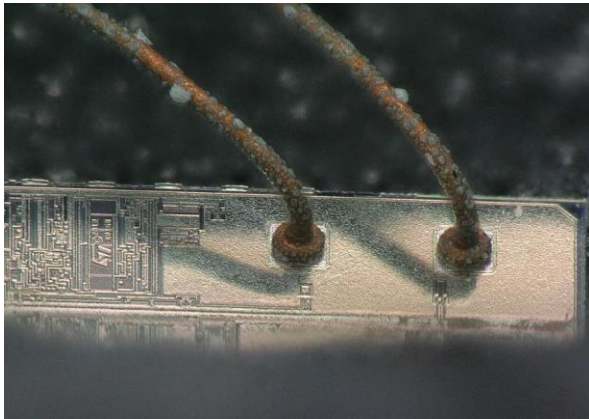


Figure 1 : Image optique de la partie puissance du DUT.

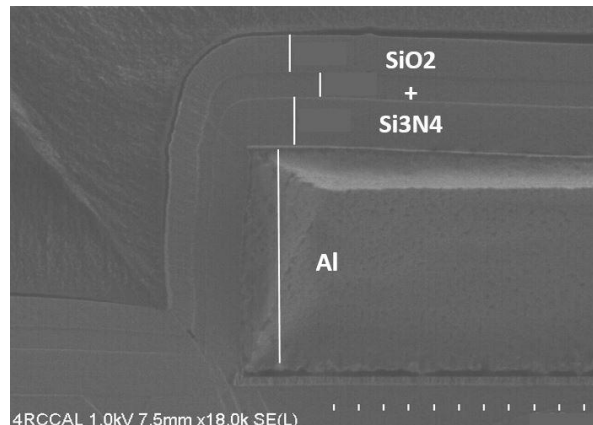


Figure 2 : section SEM de la passivation multicouche sur la partie puissance du DUT.

Pour pouvoir réaliser des mesures de températures sur une puce, le boîtier en résine qui l'encapsule est ouvert par opérations chimiques jusqu'à révéler la couche superficielle de la puce, la zone à analyser étant la partie 'puissance' (Figure 1). Cette couche 'top' des composants de microélectronique est en général revêtue de couches de passivation (Si_3N_4 , SiO_2 , Figure 2), qui vont influencer fortement sur l'émissivité [7] et le Coefficient de ThermoRéflectance (C_{TR}) [8-10]. Dans cette étude qui démarre, les signaux dynamiques IR et TR seront présentés sur des puces revêtues de leur couche de passivation. Il est prévu par la suite, d'effectuer des dépôts d'or ou de platine en surface des puces pour obtenir des mesures indépendantes des couches de passivation [8-9][11]. Sur couche d'or, seule la phase d'étalonnage (en régime stationnaire) du banc de thermoréflectance sera présentée ici.

Le composant étudié intègre une diode sensible à la température (Figure 1), pour permettre une modification (jusqu'à la coupure) du courant d'alimentation quand une valeur limite de température est dépassée. Cependant, l'étalonnage dynamique de cette diode en température n'est pas réalisé et les coupures de courant sont décidées sur des valeurs arbitraires du signal électrique délivré par cette diode. L'objectif de cette étude est donc de connaître les niveaux réels et le lieu des maxima de température atteints par la puce lorsque son fonctionnement est piloté par cette diode. Cela permettra notamment de s'assurer que celle-ci est placée à un endroit pertinent. Le signal délivré par la diode pendant le fonctionnement de la puce n'est pas accessible facilement mais il est possible d'accéder au courant d'alimentation de la puce grâce à une pince ampèremétrique (Chauvin Arnoux E3N, 100 kHz) (Figure 3). Le signal typique consiste en une succession régulière de pics, séparés d'environ $500\mu\text{s}$, la valeur maximale étant atteinte entre $120\mu\text{s}$ et $150\mu\text{s}$ et la chute vers le courant nul durant environ $50\mu\text{s}$. Le premier pic de courant est systématiquement plus élevé que tous les suivants puisque la puce est alors à température ambiante.

En raison des besoins de moyennage ou de reconstruction du signal par hétérodynage dans les dispositifs expérimentaux utilisés, la sollicitation périodique du DUT est nécessaire. Mais pour que le signal thermique résultant soit reproductible afin d'en permettre le moyennage, un temps de refroidissement suffisant doit être déterminé pour permettre au DUT de démarrer toujours à température ambiante. La séquence d'alimentation retenue qui permet un refroidissement complet possède une fréquence de 10Hz et un 'duty cycle' de 1% : la puce est 'ON' pendant 1ms (donc recevra les 2 pics de courant de la Figure 3) et 'OFF' pendant 99ms.

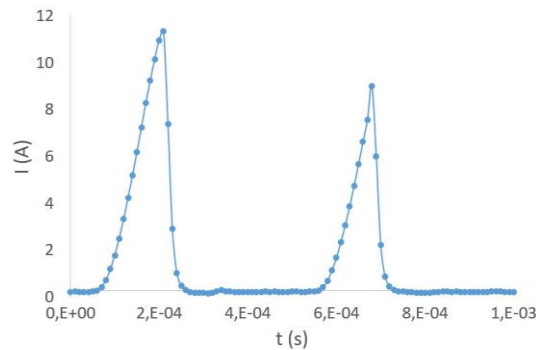


Figure 3 : Alimentation en courant du DUT, pendant la phase 'ON', mesurée toutes les 10 μ s

3. Cartographie infrarouge avec hétérodynage

Pour la cartographie thermique, une caméra infrarouge MWIR (1,1-5 μ m) est utilisée, avec une matrice de 640 \times 512 pixels de 15 μ m de côté. La camera est dotée d'objectifs à différents grossissements (\times 1, \times 5, \times 10) et le temps d'intégration (nécessaire à la prise d'une image) est réglable entre 200ms et 0,6 μ s. Le signal est numérisé (en 'counts') sur 14 bits. La fréquence d'acquisition 'full frame' est de 100Hz, et peut aller jusqu'à 1325Hz en fenêtrant l'image à 64 \times 64 pixels. Les pas de temps d'échantillonnage correspondants (respectivement 10ms et 0,75ms), sont bien plus longs que le temps d'intégration à cause de la durée consacrée à la phase de lecture de tous les pixels. Ils ne permettent donc pas de capturer correctement les échauffements consécutifs aux brefs pics de courants présentés sur la Figure 3.

Pour pouvoir analyser ces phénomènes thermiques rapides, le DUT a été alimenté en fonctionnement périodique à 10Hz (période $\Delta t_{cycl}=100ms$) et une méthode d'hétérodynage (ou 'stroboscopie') a été utilisée [2-3][12-13]. Elle consiste à choisir le pas de temps d'échantillonnage de la caméra (travaillant avec un temps d'intégration $t_i=10\mu s$) $\Delta t_{ech}=10,01ms$ tel qu'il ne soit pas un diviseur parfait de Δt_{cycl} pour qu'à chaque nouveau cycle, le signal soit acquis à un instant légèrement différent du cycle précédent. Après un nombre suffisant de cycles (ici 100 pour capturer la phase ON de la puce qui dure 1ms), un signal, résultant de la combinaison des multiples signaux acquis, peut être artificiellement reconstruit et présentera une résolution temporelle $\Delta t_{stro}=10\mu s$ mille fois meilleure que l'échantillonnage 'naturel' de la caméra.

La Figure 4 montre une des 100 images brutes obtenues (en counts, objectif \times 1), correspondant à l'instant de l'échauffement maximal pendant le premier pic de courant. Même sans conversion en vraie température, elle montre que la partie 'puissance' de la puce (en bas à gauche) est bien la zone la plus chaude. La Figure 5 montre l'évolution du flux reçu par la camera en fonction du temps moyenné sur 3 \times 3 pixels pris dans la zone centrale de la partie puissance (carré blanc sur la Figure 4) : la résolution temporelle de 10 μ s permet bien l'observation des phénomènes thermiques consécutifs aux deux pics de courant.

La Figure 6 montre que l'augmentation du grossissement (à \times 5 puis \times 10), s'il permet bien sûr d'améliorer la résolution spatiale, dégrade le rapport signal sur bruit puisque moins de

flux est collecté (le temps d'intégration est toujours de $10\mu\text{s}$, l'atténuation des signaux dépend du grandissement et de l'ouverture numérique, non identique pour chaque objectif).

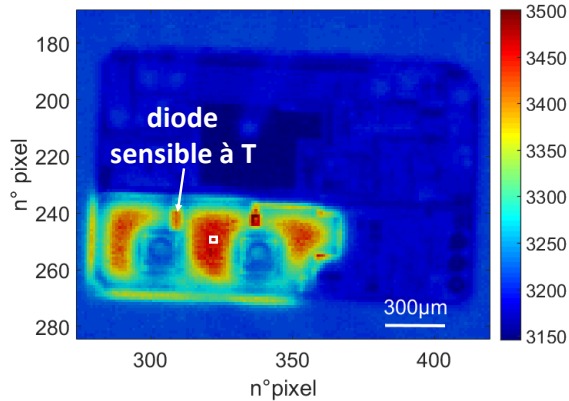


Figure 4 : (Objectif $\times 1$) Cartographie IR (en counts) de la puce sur 113×143 pixels (zone d'intérêt), à l'instant de l'échauffement maximal.

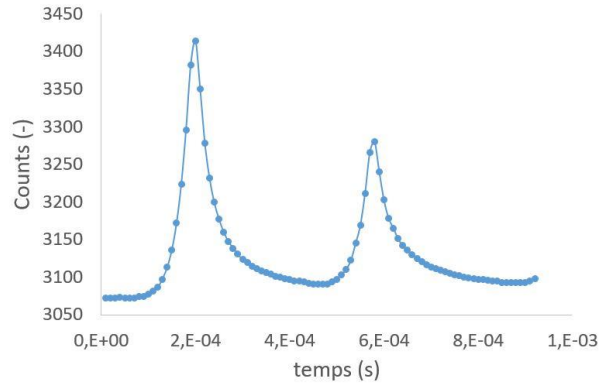


Figure 5 : Evolution temporelle du flux reçu par la caméra sur 3×3 pixels au centre de la zone (carré blanc sur la Figure 4)

Cependant, la normalisation des trois signaux entre leurs valeurs minimale et maximale (Figure 7) permet de s'assurer que les mêmes dynamiques sont capturées pour chaque grossissement.

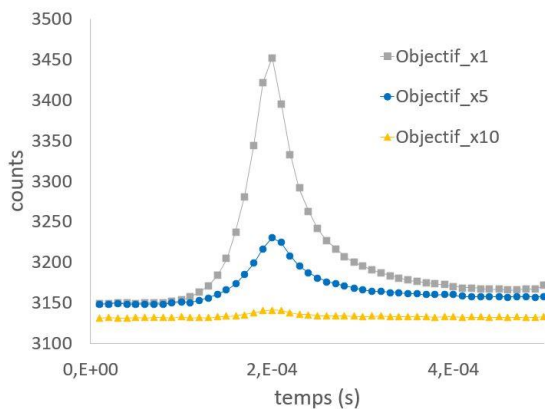


Figure 6 : Flux mesurés à 3 grossissements différents

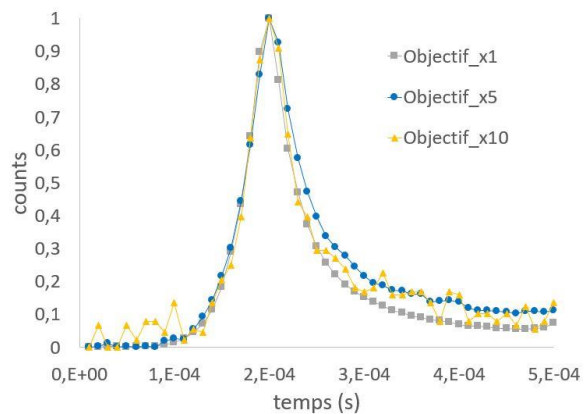


Figure 7 : Signaux normalisés pour les 3 grossissements

Pour pouvoir transformer les mesures de flux en température, il faudrait disposer de la cartographie d'émissivité de la puce mais aussi de la courbe d'étalonnage au corps noir de la caméra pour $t_i=10\mu\text{s}$. Cette dernière n'étant pas réalisée pour l'instant, un étalonnage sur la scène a été réalisé (en grandissement $\times 1$ pour $t_i=10\mu\text{s}$), il consiste à enregistrer les images IR de la puce placée à différentes températures uniformes (entre l'ambiante et 200°C) en la posant sur un élément chauffant à température contrôlée (Linkam LTSE420, $T_{\text{max}} 420^\circ\text{C}$, stabilité à $0,1^\circ\text{C}$). La courbe d'étalonnage obtenue (Figure 8) permet de convertir les signaux bruts (Figure 5) en température (Figure 9). La courbe d'étalonnage étant non linéaire dans la gamme de température explorée, l'allure temporelle des thermogrammes obtenus est différente de celle des signaux bruts, le refroidissement est notamment plus lent que ne le laisse penser le signal brut. La température dynamique maximale semble donc voisine de 120°C dans cette situation, avec cette résolution temporelle de $\Delta t_{\text{stro}}=10\mu\text{s}$.

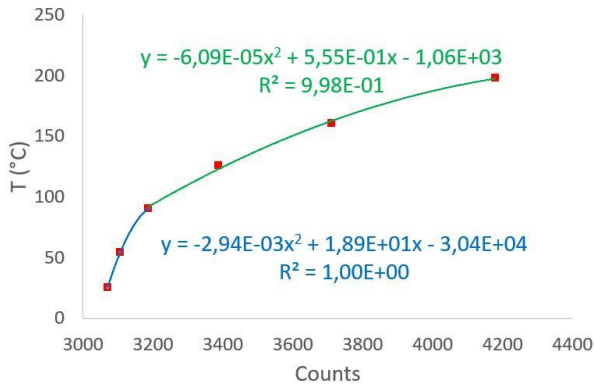


Figure 8 : Etalonnage $T (^{\circ}\text{C})=f(\text{counts})$ sur la scène (obj. $\times 1$, $t_i=10\mu\text{s}$). Deux polynômes sont utilisés pour couvrir la plage de température analysée.

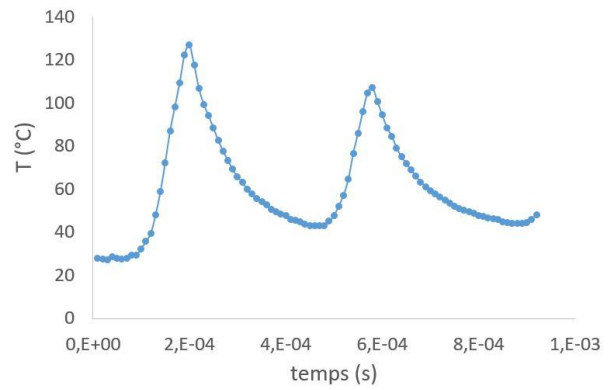


Figure 9: L'évolution de la température en fonction du temps (obj. $\times 1$, $t_i=10\mu\text{s}$)

4. Mesure de température ponctuelle par thermoréflectance (TR)

4.1. Principe et dispositif expérimental

L'objectif est ici multiple : (i) compléter la première expérience fournissant une cartographie par une expérience locale sur une zone d'intérêt, mais avec une encore meilleure résolution temporelle et (ii) s'affranchir du problème de l'émissivité, non uniforme et souvent faible, des surfaces observées. Ainsi, en parallèle de la mesure de température de surface basée sur la détection de son flux émis par la caméra infrarouge, un autre montage a été développé, basé cette fois sur la détection du flux réfléchi par la surface lorsqu'elle est éclairée par une lumière sonde. Dans cette expérience de thermoréflectance, les variations d'intensité de la lumière sonde sont liées aux variations de température $\Delta T = T - T_0$ de cette surface via les variations de sa réflectivité $\Delta R = R - R_0$ (R_0 est la réflectivité à température initiale T_0). Ces variations sont linéaires avec T sur un intervalle typique d'environ 40°C par exemple pour une surface d'or. Ainsi, les variations relatives du courant $\Delta I = I - I_0$ délivré par la photodiode mesurant la lumière sonde, sont reliées simplement à ΔT par :

$$\frac{\Delta I}{I(T_0)} = \frac{\Delta R}{R(T_0)} \approx \frac{1}{R(T_0)} \frac{dR}{dT} \Delta T = C_{TR} \Delta T \quad (1)$$

La principale difficulté de cette méthode est la détermination du coefficient de thermoréflectance (C_{TR} en K^{-1}), donnant la variation relative de réflectivité de la surface par rapport à une variation absolue de sa température. Ce coefficient, qui vaut classiquement entre 10^{-3} et 10^{-5}K^{-1} , varie fortement d'un matériau à un autre et avec la longueur d'onde. Pour cela, un travail en profondeur d'étalonnage a été fait sur le dispositif, utilisant des matériaux étalons comme l'or et le platine. Le banc est doté de deux lasers sondes à 488nm (bleu-vert, $P_{\text{max}}=10\text{mW}$) et 633nm (rouge, $P=1\text{mW}$). La lumière sonde incidente puis réfléchi passe par un microscope équipée d'un miroir dichroïque et d'une caméra CCD permettant de positionner précisément le spot laser sur l'échantillon. Ce dispositif permet ainsi de réaliser des spots laser de l'ordre de $12 \mu\text{m}$ de diamètre de façon courante (objectif à grossissement $\times 20$) et jusqu'à $5 \mu\text{m}$ de diamètre (avec un objectif $\times 50$). La résolution temporelle dépend de la chaîne de détection photodiode+amplificateur (plusieurs combinaisons possibles offrant au mieux une bande passante de 250MHz) et atteint ici quelques dizaines de nano secondes. Le signal utile étant les variations ΔI du courant de la photodiode, il sera très faible à cause de la faible valeur C_{TR} qui les relie à ΔT . La sollicitation périodique du DUT et le moyennage des signaux (entre 512 et 1024) est donc ici obligatoire pour augmenter le rapport signal sur bruit.

Une procédure d'étalonnage du banc de TR a permis de valider le bon fonctionnement du dispositif, à la longueur d'onde 488nm sur une couche d'or déposée sur un substrat de verre, combinaison intéressante souvent utilisée dans la littérature. La Figure 10 montre que l'évolution de $\Delta R/R_0$ est bien linéaire entre 30°C et 70°C, permettant d'identifier un $C_{TR}=4,7.10^{-4}K^{-1}$ cohérent avec les valeurs de la littérature (Figure 11). La dispersion de ces dernières entre 3,5 et $5,6.10^{-4}K^{-1}$ prouve le besoin de réaliser cet étalonnage dans chaque configuration expérimentale, celle-ci étant différente dans chacune des références citées.

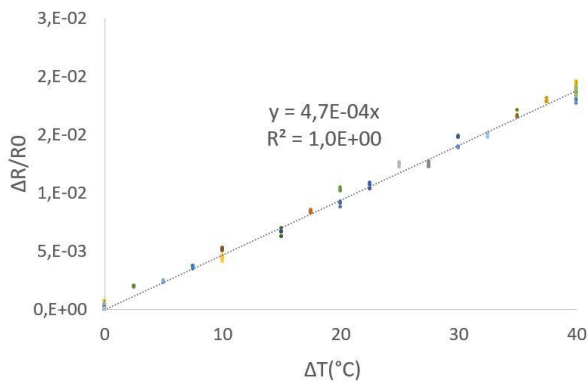


Figure 10: Etalonnage du C_{TR} de l'or à 488nm, objectif $\times 20$, la pente est le C_{TR}

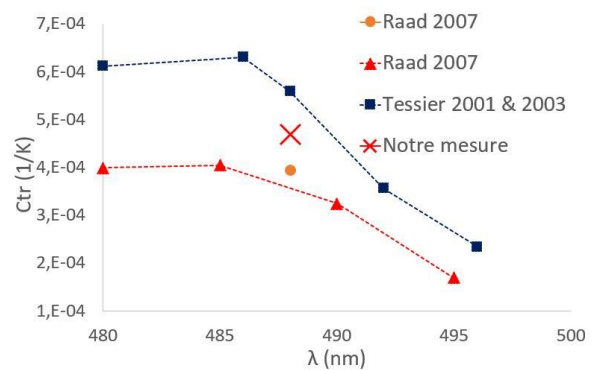


Figure 11 : Comparaison du C_{TR} mesuré avec ceux de la littérature [9 à 11] pour l'or à 488nm

4.2. Premiers résultats

Le composant étudié ici n'est pour l'instant pas revêtu de la couche d'or avec laquelle le dispositif de thermoreflectance a été validé. Nous avons cependant souhaité tester ce dispositif sur la surface de la puce en aluminium revêtue des couches de passivation (Figure 2). L'idée est de vérifier, au moins qualitativement, que le signal de thermoreflectance obtenu sur la puce en service, s'il est mesurable, a bien une allure liée au comportement thermique de la puce. La Figure 12 montre un tel signal brut, délivré par la photodiode amplifiée, obtenu dans les conditions suivantes : puce alimentée par le courant de la Figure 3, laser sonde 633nm, objectif $\times 50$, spot de diamètre $5\mu m$ visant la zone centrale de la puce, moyenne de 1024 signaux. Le signal mesuré semble bien être une signature de la thermique de la puce puisque l'on retrouve les deux pics correspondants aux pics de courant. Le signal varie négativement quand la température augmente, signe que la réflectivité de la surface chute avec la température (C_{TR} négatif). Une première mesure du C_{TR} de la surface d'aluminium passivée a alors été réalisée pour 633nm, entre 30°C et 70°C (Figure 13) qui montre bien que celui-ci est négatif. Par contre cette phase d'étalonnage demande à être approfondie avant d'être utilisée pour annoncer les vrais échauffements. En effet, le C_{TR} s'avère sensible à la position du spot laser sur la surface : il doit d'abord couvrir une zone homogène de l'aluminium (sans défauts, voir Figure 13) mais sa valeur peut encore changer à cause de l'épaisseur non uniforme des couches de passivation [9-11]. Enfin le C_{TR} des surfaces passivées peut fortement évoluer selon la plage de température [11].

Même si la conversion en vraie température demande encore de poursuivre le travail d'étalonnage, nous avons souhaité comparer les allures temporelles normalisées du signal TR (brut, obtenu cette fois à 488nm) et IR (d'abord converti en échauffement, Figure 9) sur le premier pic. On observe (Figure 14) des allures normalisées identiques, le décalage temporel entre les deux courbes étant sans doute dû au fait que ce n'est pas la même puce qui a été utilisée pour chaque expérience. Ceci tendrait à prouver que le C_{TR} à 488nm de la couche d'aluminium passivée varie peu sur la plage de température explorée (jusqu'à 120°C).

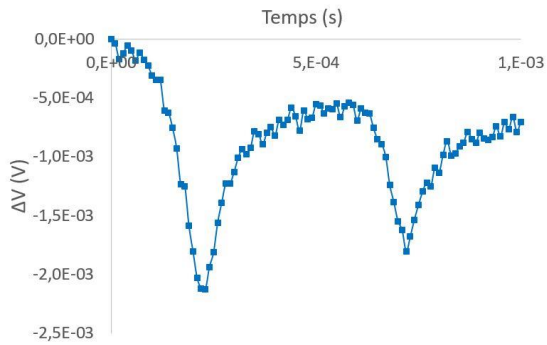


Figure 12 : *signal brut de thermoreflectance (signal de la photodiode amplifiée) obtenu sur la puce en service (surface aluminium+passivation)*

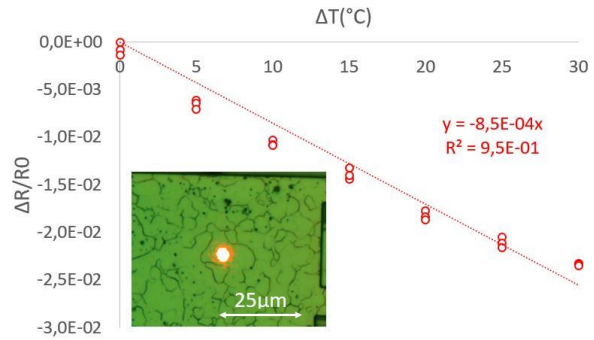


Figure 13 : *Etalonnage du C_{TR} (pente de $\Delta R/R0$ vs ΔT) du DUT à 633nm*

Enfin, toujours sans connaître la vraie température, il est pertinent d'utiliser le montage TR offrant une meilleure résolution temporelle pour vérifier que le vrai pic d'échauffement est bien capturé. Ainsi, trois différents pas de temps ont été utilisés : 10 μ s (moyenné 1024 fois), 1 μ s (moyenné 128 fois) et 100ns (moyenné 64 fois). Les résultats normalisés (Figure 15) montrent que la résolution de 10 μ s suffit ici à capturer le maximum d'échauffement.

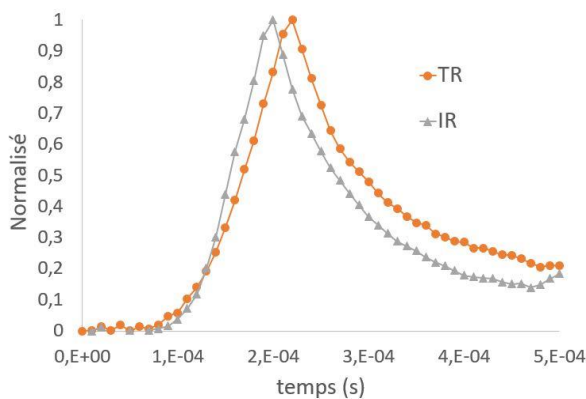


Figure 14 : *Comparaison des signaux TR et IR normalisés (échantillonnage 10 μ s)*

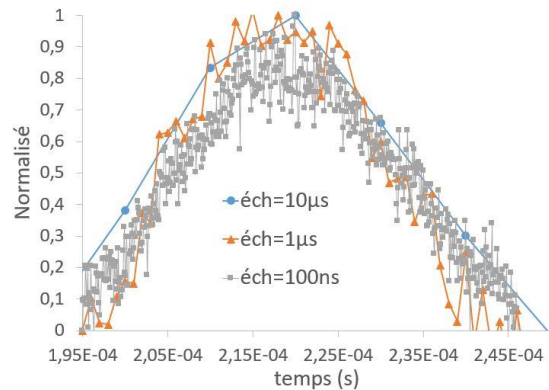


Figure 15 : *Trois échantillonnages différents du premier pic en TR*

5. Conclusions et perspectives

Dans cette communication sont présentées deux techniques utilisées en parallèle sur un même composant microélectronique pour diagnostiquer son échauffement au passage de pics de courant de quelques dizaines de microsecondes. La thermographie IR hétérodyne réalisée en 'full frame' (640 \times 512pixels de 15 μ m de côté avec un grandissement x1) permet d'augmenter la résolution temporelle naturelle de la caméra d'un facteur 1000 (10 μ s) et le niveau d'échauffement (obtenu au maximum à environ 120°C) a été déduit grâce à un étalonnage de la caméra sur la scène, permettant de se passer de la connaissance de la cartographie d'émissivité. Le banc de thermoréfectance permet, lui, d'avoir un diagnostic local (sur un spot de 5 μ m de diamètre) et les premiers signaux obtenus sur la puce non métallisée (donc sur surface d'aluminium recouverte de couche de passivation) montrent des allures cohérentes avec les signaux obtenus en IR au même endroit. La résolution temporelle de 0,1 μ s a permis de vérifier que le premier pic était suffisamment bien résolu à 10 μ s d'échantillonnage. Cette première étude croisée d'un composant par deux techniques différentes est donc encourageante et appelle plusieurs perspectives.

Sur le banc IR, il est prévu de comparer ces premiers résultats avec ceux obtenus en utilisant une cartographie d'émissivité (préalablement estimée par exemple avec la méthode des 2 températures [7]) et l'étalonnage au corps noir. Il est prévu également de tester le dispositif avec un temps d'intégration inférieur à 10 μ s, si les niveaux de flux le permettent. Sur le banc de thermoreflectance ponctuelle, outre la métallisation de la puce avec une couche d'or pour laquelle le dispositif a été étalonné, il serait intéressant de pouvoir se passer de cette métallisation donc le travail d'étalonnage sur la couche d'aluminium passivée doit se poursuivre pour comprendre la variabilité des signaux avec les propriétés de ces couches (leur épaisseur notamment) [9-11].

Références

- [1] A. Irace et al. Reliability enhancement with the aid of transient infrared thermal analysis of smart Power MOSFETs during short circuit operation. *Microelec. Reliability* 45 (2005) 1706–1710.
- [2] M. Riccio et al. An equivalent time temperature mapping system with a 320x256 pixels full-frame 100 kHz sampling rate. *Review of Scientific Instruments* 78 (2007), 106106.
- [3] M. Riccio et al. Experimental analysis of electro-thermal instability in SiC Power MOSFETs. *Microelectronics Reliability* 53 (2013) 1739–1744.
- [4] H. Köck et al. IR thermography and FEM simulation analysis of on-chip temperature during thermal-cycling power-metal reliability testing using in situ heated structures. *Microelectronics Reliability* 49 (2009) 1132–1136.
- [5] S. Grauby, et al. Laser scanning thermoreflectance imaging system using galvanometric mirrors for temperature measurements of microelectronic devices. *Rev. Sci. Instr.* 78 (2007). 074902.
- [6] J. Christofferson et al. Thermoreflectance based thermal microscope. *Rev. Sci. Instr.* 76 (2005)
- [7] T. Walach. Emissivity measurements on electronic microcircuits. *Measurement* 41(2008)503-515
- [8] L. R. de Freitas et al. Sensitivity enhancement in thermoreflectance microscopy of semiconductor devices using suitable probe wavelengths. *Journal of Applied Physics* 98 (2005), 063508.
- [9] G. Tessier et al. Measuring and predicting the thermoreflectance sensitivity as a function of wavelength on encapsulated materials. *Rev. Sci. Instr.* 74 (2003), 495-499.
- [10] G. Tessier et al. Quantitative thermal imaging by synchronous thermoreflectance with optimized illumination wavelengths. *Applied Physics Letters* 78 (2001). 2267-2269.
- [11] T. Favaloro et al. Characterization of the temperature dependence of the thermoreflectance coefficient for conductive thin films. *Review of Scientific Instruments* 86 (2015). 024903.
- [12] C. Pradere et al. High speed heterodyne infrared thermography applied to thermal diffusivity identification. Citation: *Rev. Sci. Instrum.* 82 (2011). 054901.
- [13] L. Clerjaud et al. Heterodyne method with an infrared camera for the thermal diffusivity estimation with periodic local heating in a large range of frequencies (25 Hz to upper than 1 kHz). *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 7 (2012), 115-128.
- [14] P.E. Raad, P.L. Komarov, M.G. Burzo. Thermal characterization of embedded electronic features by an integrated system of CCD thermography and self-adaptive numerical modeling. *Microelectronics Journal* 39 (2008) 1008 – 1015.

Remerciements : Ce travail a bénéficié du support du projet A*MIDEX (n°ANR-11-IDEX-0001-02, projet HIT/ALPES) financé par le programme du gouvernement français “Investissements d’Avenir”, géré par l’Agence Nationale de Recherche française.