



HAL
open science

Mesure temporelle de la température des dispositifs micro-ondes par thermoréfectance

Anass Jakani, Khallil Karrame, Raphaël Sommet, Jean-Christophe
Nallatamby

► **To cite this version:**

Anass Jakani, Khallil Karrame, Raphaël Sommet, Jean-Christophe Nallatamby. Mesure temporelle de la température des dispositifs micro-ondes par thermoréfectance. XXIIèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2022, Limoges, France. hal-03745096

HAL Id: hal-03745096

<https://hal.science/hal-03745096>

Submitted on 3 Aug 2022

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.

Mesure temporelle de la température des dispositifs micro-ondes par thermoréflexance

A. Jakani¹, K. Karrame¹, R. Sommet¹, J.C. Nallatamby¹

¹ Laboratoire XLIM, 16 rue Jules Vallès 19100 Brive la Gaillarde
anass.jakani@xlim.fr

Résumé – Une méthode optique par thermoréflexance se basant sur la réflectivité des matériaux a été mise en place afin de mesurer la température des transistors HEMT GaN. Cette méthode permet des mesures en régime transitoire ou permanent avec une résolution spatiale allant jusqu'à 300nm et une résolution temporelle allant jusqu'à 50ns avec une précision pouvant atteindre 0.5°C avec moyennage. Elle apporte notamment une information complémentaire à la mesure de la température de canal, moyennée par une méthode électrique basée sur la caractérisation du courant-tension du drain [1].

I. Introduction

Les transistors à haute mobilité électronique à base de nitrure de galium (HEMT GaN) sont devenus les dispositifs clés pour la réalisation de la prochaine génération d'amplificateurs de puissance. Cependant, les densités de puissance élevées dans ces composants induisent souvent des températures de jonction supérieures à 200°C, ce qui accélère la dégradation des performances électriques de ces dispositifs. L'étude thermique approfondie et le développement des méthodes de mesure de la température deviennent alors primordiaux. Dans cet article, nous proposons une comparaison entre deux techniques. La première, basée sur la thermoréflexance exploite la variation de la réflectivité du matériau lorsque la température de la surface de ce dernier varie [2]. La seconde consiste à mesurer les caractéristiques courant/tension Id-Vds du transistor en agissant sur la température de deux manières différentes, la première via un support thermique, et la deuxième à travers l'application de différentes puissances dissipées [1].

II. Méthode et configuration optique

1. Méthode de thermoréflexance

La figure 1 illustre le banc de thermoréflexance Microsanj disponible à Xlim. Il se compose d'une source lumineuse capable de générer quatre signaux optiques à différentes longueurs d'onde, 365nm, 470 nm, 530 et 680 nm, de quatre objectifs (x10, x25, x50 NUV (Near UV) et x100) laissant passer les longueurs d'onde, d'un piézo-électrique pour corriger les mouvements dues à la dilatation des matériaux lorsque ces derniers chauffent,

d'une caméra CCD pour analyser le signal optique réfléchi et d'une source d'excitation électrique permettant l'application de la puissance dissipée au sein des composants.

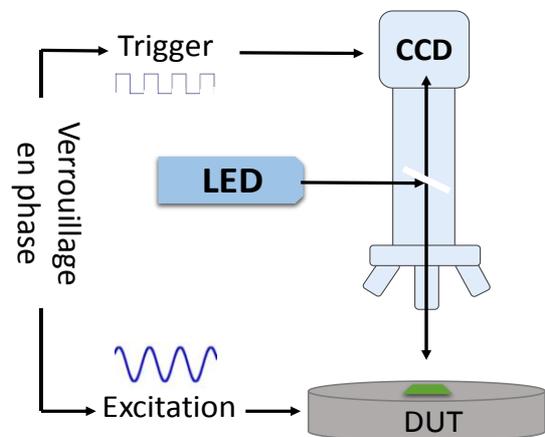


Figure 1. Banc de mesure par thermoréflexance

La réflectivité du matériau variant avec la variation de la température [3], il est donc possible d'exprimer la relation entre la variation relative de la réflectance ($\Delta R/R_0$) et la variation de température de surface de ce dernier par :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = C_{th} \cdot \Delta T \quad (1)$$

Le coefficient C_{th} représente le coefficient de thermoréflexance. Ce dernier dépend du matériau considéré, de son état de surface, de la longueur d'onde de la LED d'excitation, ainsi que de l'ouverture numérique du dispositif optique de grossissement.

Ce coefficient est obtenu lors de l'étape de calibration (figure 3) en plaçant le dispositif sous test sur un support thermique. La réflectance est alors mesurée pour deux températures 25°C et 50°C. Il est important de choisir la longueur d'onde optimale correspondant au matériau à mesurer afin d'obtenir le coefficient C_{th} le plus grand possible pour une meilleure sensibilité de mesure [5].

La figure 2 [5] montre la courbe du coefficient de thermoréflexance en fonction de la longueur d'onde pour certains matériaux.

Plus le coefficient est élevé plus facile sera la mesure.

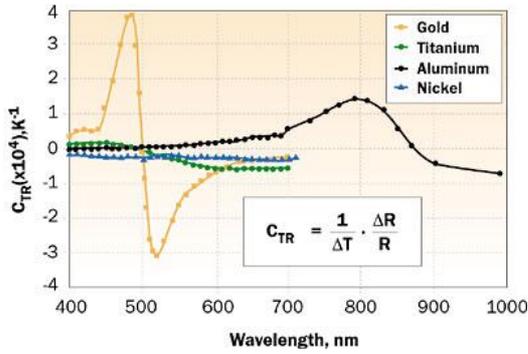


Figure 2 : Le coefficient de thermoréfectance en fonction de la longueur d'onde [5]

Deux types de mesures sont possibles avec le banc de thermoréfectance, la mesure transitoire et la mesure en régime permanent. La mesure en régime transitoire est possible en contrôlant le retard (delay) du signal optique de mesure par rapport au signal électrique d'excitation, la maîtrise du retard entre les deux signaux permet un balayage sur toute la durée du signal électrique.

2. Mesures par thermoréfectance

Des mesures sont réalisées sur deux transistors de la fonderie UMS (6 x50µm) et (8 x50µm), et un transistor de l'IEMN (2x50µm). Tous les transistors ont une longueur de grille de 150nm.

Afin de mesurer la température sous la passivation SiNx (figure 7), dans la zone où la température est maximale, une longueur d'onde de 365nm est utilisée car cette dernière traverse ce matériau. Cette source d'éclairage incohérente dispersée est de faible puissance afin de minimiser le courant photo-induit lors de la mesure. L'objectif x50 utilisé est adapté à la longueur d'onde 365nm (proche UV). Il possède une ouverture numérique égale à 0.42. La présence du piézo-électrique a pour but de corriger les mouvements nanométriques dus à la dilatation des matériaux sous l'effet de la chaleur.

a. Calibration

Le principe de la mesure par thermoréfectance repose sur l'équation suivante :

$$\frac{\Delta R}{R_0} = C_{th}(x, y, \lambda) \cdot \Delta T$$

Il est donc primordial de connaître deux paramètres pour déduire le troisième. Le paramètre $\frac{\Delta R}{R_0}$ est mesuré à l'aide de la caméra CCD, le coefficient de thermoréfectance est déduit lors de cette étape en faisant varier la température du transistor à l'aide du support thermique sur lequel repose le composant pour deux températures connues, 25 et 50°C lors de cette expérience. Le choix de faire la calibration pour seulement deux températures repose sur le fait que la réflectance thermique relative est une fonction linéaire de la température relative [4], le coefficient de thermoréfectance étant le coefficient directeur de cette fonction (fig.4), il est donc constant. Le coefficient de thermoréfectance mesuré dans la zone d'intérêt pour les transistors UMS est ($C_{th} = -1.44 \times 10^{-3} \pm$

$2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) sur la passivation ($\lambda=365\text{nm}$) et ($C_{th} = -3.5 \times 10^{-3} \pm 2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) sur la grille métallique ($\lambda=530\text{nm}$).

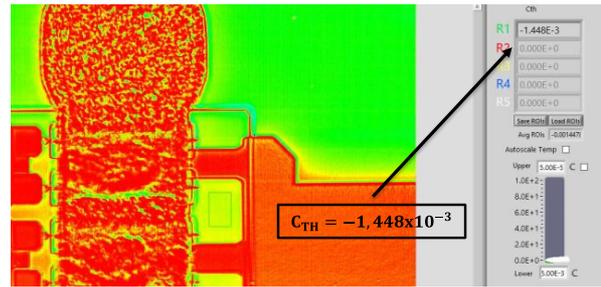


Figure 3 : Image de la calibration d'un composant à ($\lambda=365\text{nm}$)

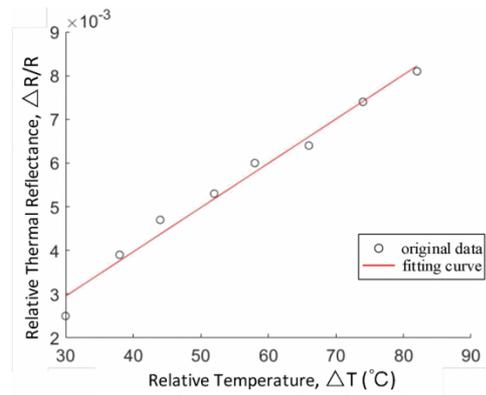


Figure 4 : Variation de la réflectance relative en fonction de la variation de température [4]

b. Mesure

Comme lors de l'étape de la calibration, la caméra CCD mesure le paramètre $\frac{\Delta R}{R_0}$ pour deux températures. Connaissant cette fois-ci le coefficient de thermoréfectance C_{th} , il est possible de déduire ΔT qui représente la variation de température du transistor en excitation par rapport à sa température de repos à $V_{ds} = 0 \text{ V}$.

Deux types de mesure ont été effectués sur trois transistors : une mesure en régime transitoire sur un transistor UMS 8x50µm et celui de l'IEMN 2x50µm et une autre en régime permanent sur un transistor 6x50µm. La Figure 5 montre les images thermiques des deux transistors 8x50µm et IEMN 2x50µm en fonctionnement avec les zones les plus chaudes (proches des grilles).

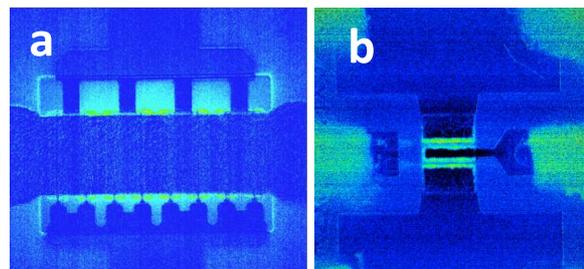


Figure 5 : Images thermiques des transistors excités (a) 8x50µm (b) IEMN 2x50µm

Le transistor IEMN est excité par une impulsion électrique de largeur 20µs et une période de 100µs. Pour le composant de la fonderie UMS, l'impulsion choisie est de 100µs avec une période de 1ms. La puissance dissipée dans les deux transistors est de 0.7W.

Pour le transistor 6X50 µm, une différence de température de 27°C est mesurée en régime permanent pour une puissance dissipée de 0.63W en régime permanent. Cela conduit à une résistance thermique de 42.3 °C/W.

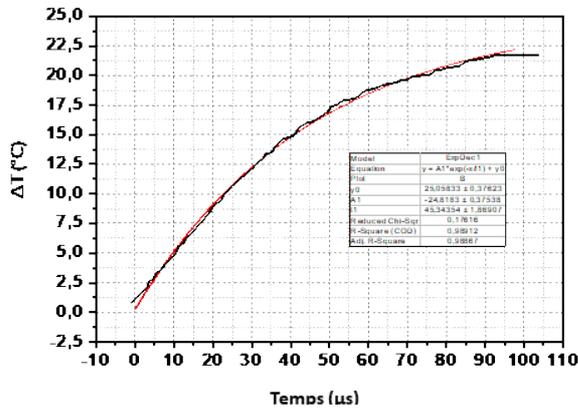


Figure 6 Mesure transitoire GH15 8x50µm

La Figure 6 montre que la variation de la température mesurée dans la zone d'intérêt en régime permanent pour le transistor 8x50µm est $\Delta T = 22^\circ\text{C}$. La résistance thermique est donc :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{diss}} = 31.40 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Les deux valeurs de Rth obtenues sont cohérentes avec les données du constructeur : $R_{th} = 13 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{mm/W}$.

La Figure 8 montre la réponse temporelle de la température du composant IEMN (2x50µm) dans deux zones différentes comme illustré en bleu et rouge sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** La courbe en rouge représente la température proche de la zone la plus chaude capturée par la caméra CCD à travers la passivation, la courbe en bleu représente la variation de la température en surface de la métallisation de grille.

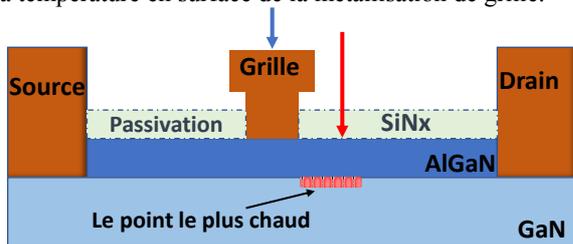


Figure 7: Illustration des deux zones de mesure de la température

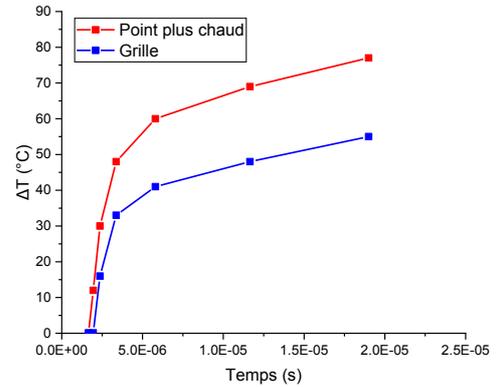


Figure 8 : Mesure transitoire IEMN

La chaleur est dissipée dans le canal à la verticale de la grille coté drain comme illustré sur la figure 7. Un décalage temporel de quelques dizaines de nanosecondes est observé entre les deux courbes ainsi qu'une forte différence d'amplitude : la métallisation de grille chauffe avec quelques dizaines de nanosecondes de retard par rapport au point le plus chaud. Ceci est dû au temps de diffusion nécessaire de la puissance jusqu'à cette dernière. Les deux courbes révèlent une différence de température d'environ 22°C pour 1 µm de différence spatiale ce qui traduit un fort gradient thermique.

III. Mesure électrique

Dans cette partie, une mesure électrique a été réalisée sur les deux transistors d'UMS afin de comparer les résultats de la résistance thermique avec ceux obtenus en utilisant la méthode optique. Cette méthode électrique est basée sur la caractérisation $I_{ds}(V_{ds})$ en fonction de la température apportée respectivement soit par le « chuck thermique » soit par la polarisation électrique.

Deux étapes sont alors nécessaires, l'étape de la calibration et l'étape de mesure. La première étape consiste à caractériser la résistance du transistor R_{ON} en fonction de la température apportée extrinsèquement par le support thermique sur lequel repose le transistor sous points. La calibration est effectuée en faisant varier la température du support thermique, typiquement de 25°C à 125°C, et cela pour la même tension de grille V_{GS} . La valeur de R_{ON} est extraite des courbes caractéristiques du transistor en mesure impulsionnelle pour chaque température.

La Figure 9 montre la variation du courant I_{ds} en fonction de la température du support thermique pour le transistor 6x50µm. La résistance R_{ON} est extraite de la pente de la courbe caractéristique $I_{ds}(V_{ds})$. La Figure 10 montre que la résistance R_{ON} augmente linéairement en fonction de la température, elle peut être alors exprimée sous la forme suivante :

$$R_{ON} = a_T \cdot \Delta T + b \quad (1)$$

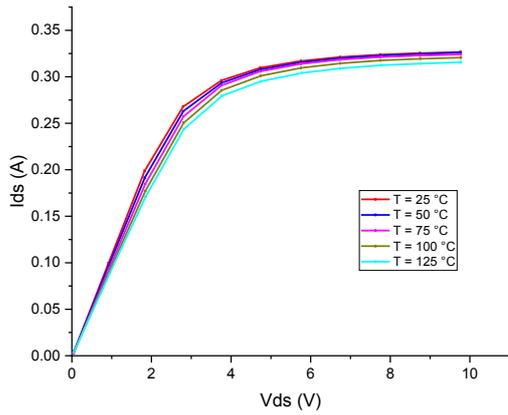


Figure 9 : Une courbe caractéristique $I_{ds}(V_{ds})$ du transistor $6 \times 50 \mu\text{m}$ à différentes températures du support thermique, pour $V_{gs}=0\text{V}$

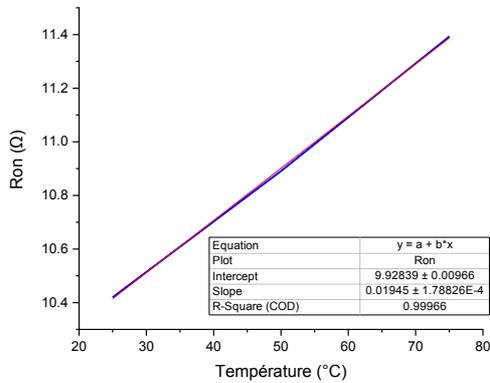


Figure 10 : La résistance R_{ON} vs température du support thermique pour le transistor UMS $6 \times 50 \mu\text{m}$

La deuxième étape consiste à exprimer la résistance du transistor R_{ON} en fonction de la puissance dissipée, cette dernière est apportée par l'application de différents points de polarisation (V_{GS0}, V_{DS0})

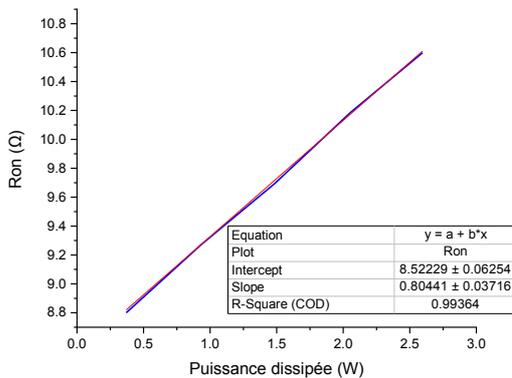


Figure 11 : La résistance R_{ON} vs La puissance dissipée pour le transistor UMS $6 \times 50 \mu\text{m}$

La Résistance R_{ON} est extraite, de la même manière, des courbes caractéristiques du transistor, elle est une

fonction linéaire de la puissance dissipée, elle peut être exprimée sous la forme suivante :

$$R_{ON} = a_p \cdot P_{diss} + b \quad (2)$$

Il est possible à partir des deux équations précédentes (1) et (2), d'exprimer la variation de la température en fonction de la puissance dissipée :

$$a_T \cdot \Delta T = a_p \cdot P_{diss} \quad (3)$$

Avec $b = R_{ON}$, à $T = T_0$ ou à $P_{diss} = 0 \text{ W}$

La résistance thermique est déduite de la loi d'Ohm thermique en fonction des coefficients directeurs des équations (1) et (2) :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{diss}} = \frac{a_p}{a_T} \quad (4)$$

Transistor UMS	a_p	a_T	$R_{th} (^{\circ}\text{C}/\text{W})$
$6 \times 50 \mu\text{m}$	0.804	0.0190	42.3
$8 \times 50 \mu\text{m}$	0.550	0.0175	31.4

Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux obtenus par la méthode optique.

IV. Conclusion

La mesure thermique par thermoréfectance est l'une des méthodes les plus performantes de nos jours, aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire avec une résolution temporelle de 50ns. Elle permet d'obtenir une cartographie de la température d'un composant sur chaque pixel de l'image captée par la caméra CCD avec une résolution spatiale pouvant aller jusqu'à 300 nm. Les résultats obtenus en termes de résistance thermique sont cohérents avec ceux obtenus par d'autres méthodes de type électrique, telle que la méthode basée sur des mesures I(V) pulsées [1].

Références

- [1] G. Mouginot, R. Sommet, R. Quéré, Z. Ouarch; S. Heckmann, M. Camiade, "Thermal and trapping phenomena assessment on AlGaIn/GaN microwave power transistor,"(EuMIC), Sept. 2010 pp. 110-113
- [2] A. Jakani, R. Sommet, J. -C. Nallatamby and C. Charbonniaud, "Dual Approach for the characterization of the thermal impedance using 3omega and thermoreflectance methods," INMMiC, 2020
- [3] A. Shakouri et al., "Stable thermoreflectance thermal imaging microscopy with piezoelectric position control,"pp. 128–132, doi: 10.1109/SEMITHERM.2016.7458456
- [4] D. Wang, L. Zheng, W. Si, H. Yang and Y. Gao, "Thermal Analysis of High-Power Light-Emitting Diode Using Thermoreflectance Thermography," 2021 22nd International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEPT52650.2021.9568025.
- [5] P. E. Raad, P.L. Komarov, and M. G. Burzo, "Thermo-Reflectance Thermography For Submicron Temperature Measurements," Electronics Cooling, v. 14, Feb 1, 2008