

Processus de mesure de la température de jonction de transistors en technologie GaN

Pr Bertrand BOUDART et Yannick GUHEL, Fanny BERTHET, Sébastien PETITDIDIER, Guillaume BROCERO









La miniaturisation des systèmes augmente.

La puissance des systèmes augmente.

Donc la densité de puissance augmente et la température interne devient un facteur clé.

Celle-ci a tendance à diminuer les performances et accélérer le vieillissement.

Il faut donc la contrôler et l'estimer précisément.





Différentes techniques

Pour estimer la température interne il semble difficile d'utiliser un pyromètre optique.



Ou des cristaux liquides ! Encore que :



Mesures au pincement pour évaluer le champ électrique interne (J.Möreke et al dans Microelectronics Reliability 54 (2014) 921)





• Différentes techniques

Mesures électriques : connaissant l'évolution des caractéristiques électriques des composants en fonction de la température on peut donc remonter à la température.



Diminution de la tension de seuil d'une diode en fonction croissante de la température.

Mais la mesure de température est forcément moyennée.





• Différentes techniques

Ce sont les méthodes optiques qui sont le plus utilisées car elles permettent une meilleure résolution spatiale :

- La plus courante est la thermographie infrarouge.
- Il y a aussi la mesure de thermo réflectivité.
- Et les possibilités de la spectroscopie Raman.





• Thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est utilisée depuis plus de 50 ans mais le développement pour des applications en microélectronique date d'une vingtaine d'années.

C'est une technique très utilisée qui permet une approche globale mais qui se trouve limitée spatialement à quelques micromètres (5-15 μ m). L'information déduite est donc forcément une moyenne issue de la surface étudiée et ne reflète pas les disparités très localisées.





• Thermographie infrarouge

La zone analysée dépend du choix des objectifs mais aussi de la longueur d'onde optique utilisée. Si l'on veut étudier une surface inférieure au micromètre, afin d'être en adéquation avec les composants actuels, alors il est nécessaire de diminuer la longueur d'onde et de changer de domaine spectral.

Il faut donc travailler en visible.





• Thermoréflectivité

L'utilisation de la thermo réflectivité appliquée aux semiconducteurs date de la fin des années 60 et avait pour but l'étude des structures de bandes de ces matériaux. Ce n'est que très récemment que cette technique a été utilisée pour des mesures d'échauffement localisé de composants électroniques.





Thermoréflectivité



www.microsanj.com

L'échantillon est éclairé avec une lumière visible (LED), ce qui permet d'étudier une petite surface (inférieure au micromètre avec un objectif de fort grossissement), et on mesure la variation de la réflectivité due à un changement de température.





• Thermoréflectivité

La variation de la Réflectivité d'un matériau est liée à un changement de Température par :

 $\Delta R / R = \kappa \Delta T$

Où κ est le coefficient de thermo réflectivité de l'ordre de 10⁻² à 10⁻⁵ K⁻¹ et qui dépend :

- Du matériau étudié
- De la longueur d'onde de la lumière éclairante
- De l'angle d'incidence (généralement normal) donc de la rugosité donc du process
- De couches de passivation





• Thermoréflectivité

Cette technique peut être très efficace pour des matériaux de haute réflectivité c'est à dire des métaux. Ainsi il est possible de déterminer la température en surface des contacts ou des pistes métalliques.

Il semble plus délicat de déterminer l'échauffement de semiconducteurs car ceux-ci possèdent des coefficients de thermo réflectivité bien plus faibles que les métaux.





Thermoréflectivité



www.microsanj.com

Une mesure de température précise nécessite donc l'adaptation de la longueur d'onde de la lumière incidente au matériau sondé.





En 1928, C. Raman découvre l'effet « Raman » qui lui a valu le prix Nobel de physique en 1930. La diffusion de la lumière par un matériau se fait selon 3 processus :



- La diffusion Rayleigh sans changement de longueur d'onde
- La diffusion Stokes (10⁻⁶ fois plus faible en intensité)
- La diffusion anti-Stokes encore moins intense







Spectromètre Raman



Spectre Raman de GaN obtenu avec un laser visible







→ La position des pics permet d'identifier le matériau caractérisé

 \rightarrow La position des pics dépend de l'état de contrainte du matériau

 \rightarrow La largeur à mi-hauteur des pics permet d'avoir des informations sur la qualité du matériau étudié

→ L'amplitude des pics dépend du matériau mais aussi de la durée d'enregistrement







 \rightarrow La position du pic Raman diminue avec la température

 \rightarrow La largeur à mi-hauteur du pic Raman augmente avec la température

 \rightarrow L'amplitude du pic Raman diminue avec la température

Grande influence de la température 30, 100 et 160 °C





Il existe essentiellement deux méthodes pour déterminer la température :

- 1. Utiliser le rapport d'intensité des raies Stokes et anti-Stokes
- 2. Utiliser le déplacement d'une raie (Stokes car plus intense) en fonction de la température





1. Utilisation du rapport d'intensité des raies Stokes et anti-Stokes

$$\frac{I_S}{I_{AS}} = \exp\left[\frac{\hbar\omega_0}{k_BT}\right] \quad \text{ou} \quad \frac{I_S}{I_{AS}} = \frac{\alpha_I + \alpha_{AS}}{\alpha_I + \alpha_S} \left[\frac{\omega_S}{\omega_{AS}}\right]^3 \frac{S(\omega_I, \omega_S)}{S(\omega_I, \omega_{AS})} \exp\left[\frac{\hbar\omega_0}{k_BT}\right]$$

M. Balkanski et al dans Phys. Rev. B 28 (1983) 1928

The temperature is given by the following equation $\frac{I_S}{I_{AS}} = Ce^{\frac{\hbar\omega_j}{kT}}$ where I_S and I_{AS} are the Stokes and anti-Stokes intensity, C is a calibration factor and ω_j the phonon peak frequency.

R.Aubry et al dans Eur. Phys. J. Appl. Phys. 30 (2005) 77-82





Illustration : GaN/Si AS et S à la même température



R.Aubry et al dans Eur. Phys. J. Appl. Phys. 30 (2005) 77-82 Quand la température augmente l'amplitude des raies diminue et il faut augmenter le temps d'acquisition en AS.





2. Utiliser le déplacement d'une raie en fonction de la température

$$\Omega(T) = \omega_0 + \Delta(T)$$

Où $\Delta(T) = C \left[1 + \frac{2}{e^x - 1} \right] + D \left[1 + \frac{3}{e^y - 1} + \frac{3}{(e^y - 1)^2} \right]$

$$x = \hbar \omega_0 / 2k_B T$$
 $y = \hbar \omega_0 / 3k_B T$ C et D, constantes



M. Balkanski et al dans Phys. Rev. B 28 (1983) 1928

ou
$$\omega(T) = \omega_0 - \frac{A}{e^{B\hbar\omega_0/k_BT} - 1}$$

Où A et B sont des constantes



M.S. Liu et al dans Appl. Phys. Lett. 74 (1999) 3125





2. Utiliser le déplacement d'une raie en fonction de la température

Cellule en température (LINKAM TS 1500) :



580 $0,1 \text{ cm}^{-1} = 5 \text{ °C}$ Déplacement Raman (cm⁻¹) 575 570 565 560 555 550 200 0 400 600 800 1000 Temperature (K)

On réalise une courbe d'étalonnage

Courbe linéaire de 293 à 773 K





Illustrations



HEMT AIGaN/GaN

W = 150 μm Lg = 0,5 μm 1 doigt de grille



Etude au point 2







Possibilité pour les composants multidoigts









Quantifier la température très localement

R. Simms et al dans IEEE Trans. On Electron. Dev. 55 (2008) 478



Système confocal

H.Ji et al dans IEEE Trans. On Electron. Dev. 53 (2006) 2658









Avec un laser visible : t° dans GaN et au niveau du substrat Modulation de la profondeur sondée

I. Ahmad et al dans APL 100 (2006) 113718









A. Sarua et al dans IEEE Trans. On Electron. Dev. 53 (2006) 2438







En UV les signaux sont beaucoup plus faibles

Mais on peut observer la photoluminescence à T_{amb} qui varie avec la t° !

voir T. Batten et al dans JAP 107 (2010) 074502





Mesures en transient



M. Kuball et al dans Phys. Stat. Sol. (a) 6 (2007) 2014



G.J. Riedel et al dans IEEE Electron Device Lett. 29 (2008) 416





Sinon il reste la solution développée par INTEL !





Il ne reste plus qu'à se déplacer sur le circuit pour faire les mesures !





Une fois les mesures terminées il n'y a plus qu'à revenir à la taille normale !







Est-ce donc si simple ? Oh que non !!!

Le mot clé : calibration !

• Merci de votre attention !

