HAL
open science

La thermique des transistors GaN en régime transitoire : Théorie et mesures

Anass Jakani, Khalil Karrame, Luc Kakou, Raphaël Sommet, Jean-Christophe Nallatamby

To cite this version:

Anass Jakani, Khalil Karrame, Luc Kakou, Raphaël Sommet, Jean-Christophe Nallatamby. La thermique des transistors GaN en régime transitoire : Théorie et mesures. XXIIèmes Journées Nationales Microondes, Jun 2022, Limoges, France. hal-03745103

HAL Id: hal-03745103

https://hal.science/hal-03745103v1

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.

La thermique des transistors GaN en régime transitoire : Théorie et mesures

A. Jakani[1], K. Karrame[1], N. L. A. Kakou[1], R. Sommet[1] JC. Nallatamby[1]

[1] *Laboratoire XLIM, 7 rue Jules Vallès, 19100 Brive-La-Gaillarde*
anass.jakani@xlim.fr

Résumé *–Une équation analytique est présentée pour estimer la résistance thermique et la constante de temps qui possède le plus fort impact sur le comportement thermique du transistor. Cette dernière est calculée à partir des dimensions et des propriétés physiques des matériaux présents pour une structure simplifiée de transistor HEMT GaN pour un seul doigt de grille. Cette équation est validée par des mesures optiques basées sur une méthode de thermoreflectance*

1. Introduction

Les transistors HEMT à base de nitrure de galium (GaN) sont des candidats idéaux pour les applications qui demandent à la fois un fonctionnement en haute fréquence et en forte puissance. Cependant, à cause des densités de puissance dissipées élevées dans ces transistors, l'étude thermique de ces composants de puissance devient critique pour assurer leur fiabilité.
La résistance thermique des composants de puissance est généralement calculée avec des modèles de cône de dissipation, des solutions analytiques basés sur les séries de Fourier, des solutions numériques en utilisant les calculs par éléments finis (FEM) où un nombre important de mailles est nécessaire pour conduire à un bon résultat. Les solutions analytiques présentées dans la littérature calculent la résistance thermique de structures simples, où beaucoup de suppositions sont faites pour simplifier le calcul. Par exemple Masana [1] prend comme hypothèse un cône de dissipation thermique égal à 45°, et Darwish [2] utilise un système de coordonnées sphéroïdales et ellipsoïdes pour déterminer la résistance thermique des dispositifs multi-doigts.
Dans notre travail nous proposons une formule analytique pour retrouver la résistance thermique extraite à partir des simulations numériques. Nous validerons par la suite les résultats obtenus par des mesures de résistance thermique en utilisant la méthode de thermoreflectance.

2. Simulation 3D – Salome-meca

2.a. Description de la structure utilisée

La structure des transistors GaN est constituée de plusieurs couches épitaxiées de hauteur différente, notamment un substrat (Si ou SiC) avec une épaisseur comprise entre 70µm et 360µm, une couche GaN tampon d'une épaisseur de 15 à 30 nm. L'emplacement du point le plus chaud se trouve dans le canal entre la couche tampon et la couche barrière à proximité du drain. La distribution spatiale exacte de cette source de chaleur dans la région d'accès grille-drain dépend fortement de la structure de la grille, de la structure de la plaque de champ si elle est présente, et de la polarisation de la grille et du drain
Une modélisation thermique de toute la structure d'un HEMT GaN consomme énormément de temps et elle est complexe en raison de la grande amplitude dimensionnelle entre l'épaisseur de la barrière et la longueur de la puce (1mm). Un certain nombre de simplifications sont possibles sur la structure étudiée d'un transistor sans réduire de façon significative la précision de la solution trouvée. Par exemple, l'épaisseur de la barrière (AlGaN) est suffisamment mince, son impact sur la propagation de la chaleur est relativement mineur. La source de chaleur du canal avec une profondeur de 100nm dans le tampon et peut être approximée par un flux thermique au sommet du GaN tampon. Les deux couches qui impactent le plus la résistance thermique et la constante de temps thermique sont la couche GaN tampon et le substrat Si ou SiC.
La figure 1 montre la structure simplifiée utilisée dans cette étude où Ksic et Kgan sont les conductivités thermiques différents matériaux.

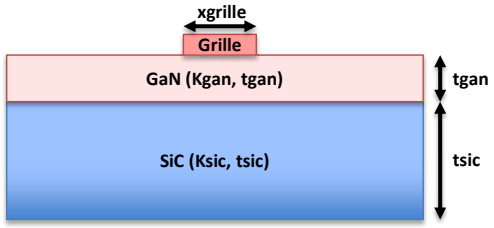

Figure 1. Structure simplifiée d'un transistor GaN

2.b. *Résultats de la simulation numérique R_{th}*

Nous cherchons à déterminer une formule pour calculer la résistance thermique à partir des paramètres géométriques (tgan, tsic, xgrille) et physiques (Kgan, Ksic). Nous utilisons le logiciel de simulation par éléments finis Salome-meca, développé par EDF pour simuler la structure de la Fig.1, en faisant varier les valeurs des différents paramètres (conductivité thermique, épaisseur de chaque couche, …), et en appliquant une densité de puissance constante sur la grille et une température de socle T_0=25°C sur le bas de la structure. Les parois latérales sont supposées adiabatiques.

La Fig.2 montre que la résistance thermique de la structure (Fig.1) varie linéairement en fonction du logarithme de la longueur du doigt de grille. Les épaisseurs et les conductivités thermiques ont des valeurs constantes (t_{sic}=70µm, t_{gan}=2µm). La longueur du doigt de grille x_{grille} varie entre [0.1 ; 10] µm.

$$R_{th} = \alpha.\log(x_{grille}) + \beta \qquad (1)$$

Pour déterminer les deux paramètres $\boldsymbol{\alpha}$ et $\boldsymbol{\beta}$ en fonction des autres paramètres physiques (épaisseurs/conductivités thermiques des matériaux). Nous effectuons ainsi d'autres simulations en faisant varier ces paramètres en fonction des conductivités thermiques et des épaisseurs. La Fig.1 représente R_{TH} en fonction de x_{grille} et nous obtenons ainsi finalement l'équation (2)

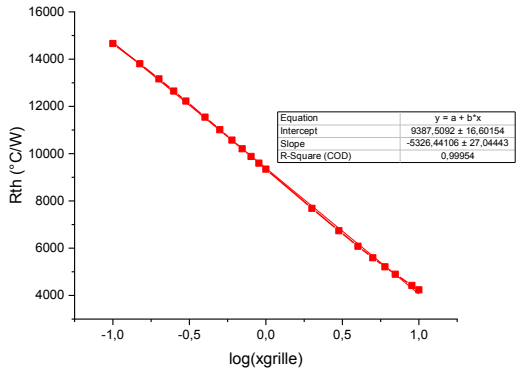

Figure 2. Résistance thermique en fonction de la longueur du doigt

$$R_{th} = \left(\frac{-0.68343}{kgan} - 23.272\right).\log(xgrille) + \left(\frac{0.721}{kgan} - \frac{0.7087}{ksic} - 9.4367\right).\log(tgan) + \left(\frac{0.7386}{ksic} + 27.495\right).\log(tsic) + \frac{0.6493}{kgan} + 101.114 \qquad (2)$$

2.c. *Résultats de la simulation numérique - τ_{th}*

Nous nous intéressons maintenant à la notion de constante de temps thermique de la structure. La structure simulée est présentée Fig.3. La méthode d'extraction est basée comme précédemment, sur un ensemble de simulations transitoires réalisées à l'aide du logiciel de simulation ANSYS en faisant varier les différents paramètres de la Fig.3 (K, ρ, Cp).

La seconde étape consiste à extraire les différentes matrices pour chaque simulation (matrice de conductivité, chaleur massique) et le vecteur des conditions aux limites représentative du système thermique linéaire.

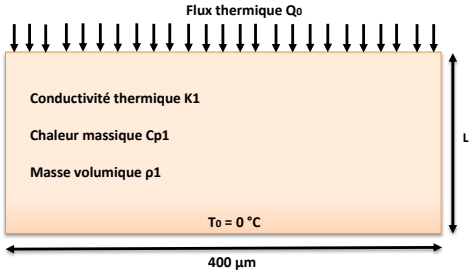

Figure 3. Structure 1D

En utilisant alors la méthode de la réduction d'ordre [4], programmée sous Scilab, les différentes constantes de temps avec leurs pondérations sont extraites. Notre étude paramétrée en fonction de (K, ρ, Cp)conduit à la formule suivante :

$$\tau_n = \frac{4.\rho.Cp.L^2}{(n-1)^2.\pi^2.K} \qquad (3)$$

Dans [5], Bagnall retrouve cette même formule à partir d'un calcul purement analytique.

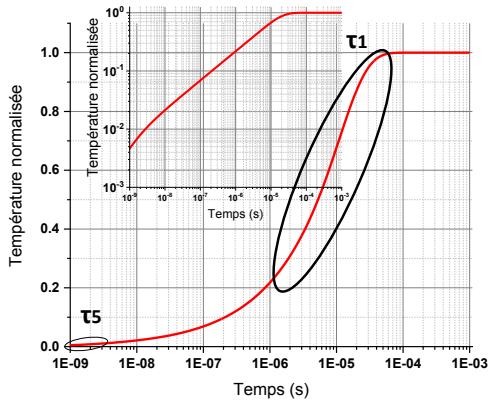

Figure 4. Réponse de la température normalisée en fonction du temps

La figure 4 présente la réponse transitoire de la température normalisée, les différentes constantes de temps extraites par la technique de la réduction d'ordre. La figure 5 montre le poids fractionnaire de la température normalisée en fonction du spectre des constantes de temps thermique. La constante de temps la plus longue représente 81% de la contribution totale de la température. La deuxième constante de temps influe pour 9% de la température en régime permanent. Dans ce cas de figure, cinq constantes de temps thermiques contribuent à l'élévation de la température maximale.

Ces résultats soulignent d'une part que plus d'une constante de temps est nécessaire pour représenter le comportement thermique transitoire d'une simple

structure 1-D, et d'autre part, ils montrent la difficulté et la complexité de l'approche transitoire.

Constante de temps (s)	Réduction d'ordre	Réf. [5]
τ_1	$1{,}087.10^{-5}$	$1{,}087.10^{-5}$
τ_2	$1{,}208.10^{-6}$	$1{,}208.10^{-6}$
τ_3	$4{,}358.10^{-7}$	$4{,}348.10^{-7}$
τ_4	$2{,}228.10^{-7}$	$2{,}218.10^{-7}$
τ_5	$1{,}352.10^{-7}$	$1{,}342.10^{-7}$

Tableau 1. Comparaison résultats analytique et numérique

La raison intrinsèque de l'apparition de plusieurs constantes de temps avec la réduction d'ordre est la présence d'un gradient de température dans le substrat.

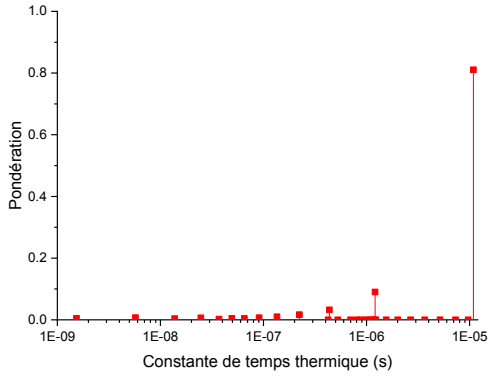

Figure 5. Le spectre de la constante de temps thermique pour une structure monocouche (1-D) utilisant la réduction d'ordre

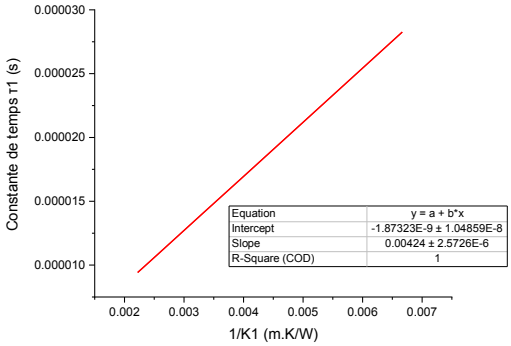

Figure 6. Illustration de la constante de temps en fonction de la conductivité thermique

Nous cherchons par la suite à trouver une formule analytique de la constante de temps thermique la plus longue en fonction des paramètres physique du système défini précédemment (figure 1).

Dans un premier temps, cette constante de temps thermique est extraite pour différentes conductivités thermiques K1 variant entre 150 et 450 W/m.K.

La figure 6, montre que la constante de temps la plus longue τ_1 varie linéairement en fonction de l'inverse de la conductivité thermique du système. Cette constante de temps s'exprime par :

$$\tau_1 = \frac{\alpha}{K1} + \beta \qquad (4)$$

La valeur de β est négligeable devant $\frac{\alpha}{K1}$, l'équation 1 s'exprime alors comme

$$\tau_1 = \frac{\alpha}{K1} \qquad (5)$$

Nous cherchons par la suite, à déterminer le comportement du paramètre α en fonction de la masse volumique ρ1. Toujours avec la réduction d'ordre, la constante de temps thermique est obtenue pour différentes masse volumique ρ1 entre 1500 et 5000 kg/m^3, toujours en faisant varier la conductivité thermique K1.

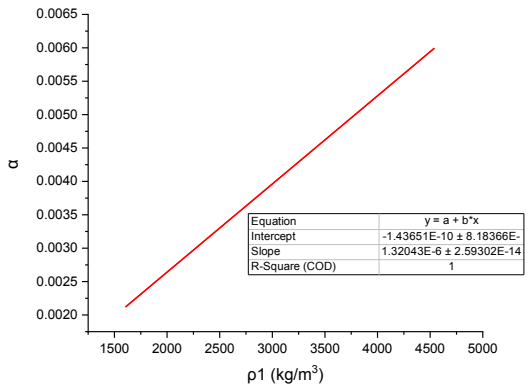

Figure 7. La réponse de α en fonction de la masse volumique

La figure 7 montre que α varie de façon linéaire en fonction de la masse volumique.

$$\alpha = a.\rho 1 + b \qquad (6)$$

Le coefficient b est négligeable devant $a.\rho 1$, ce qui signifie que la constante de temps thermique τ_1 varie elle aussi de façon linéaire en fonction de la masse volumique.

$$\tau_1 = \frac{a.\rho 1}{K1} \qquad (7)$$

En faisant varier la chaleur massique entre 356 et 665 J. Kg^{-1}. K^{-1}. Le paramètre (a) varie linéairement en fonction de la chaleur massique Cp1.

$$a = \vartheta C_p + d \qquad (8)$$

Le coefficient d lui aussi est négligeable par rapport ϑC_p. La constante de temps thermique varie linéairement en fonction de la chaleur massique.

$$\tau_1 = \frac{\vartheta.\rho 1.C_{p1}}{K1} \qquad (9)$$

Et finalement avec la figure 8, nous pouvons conclure que la constante de temps thermique bouge linéairement avec le carré de l'épaisseur.

$$\tau_1 = \frac{0{,}399.\rho.Cp.L^2}{K} \qquad (8)$$

L'équation (8) est semblable à l'équation (3) obtenue par Bagnall ($0.4 = \frac{4}{\pi^2}$)

La solution analytique 1-D donnée par l'équation (8) fournit un certain nombre d'informations utiles sur la physique de la conduction thermique transitoire. Premièrement, elle montre comment les dimensions

(épaisseur de la couche) et les propriétés physiques (conductivité thermique, masse volumique et chaleur massique) influent sur les constantes de temps dans le système. La contribution de cette constante de temps est de 81% par rapport aux autres constantes de temps présentes dans le système.

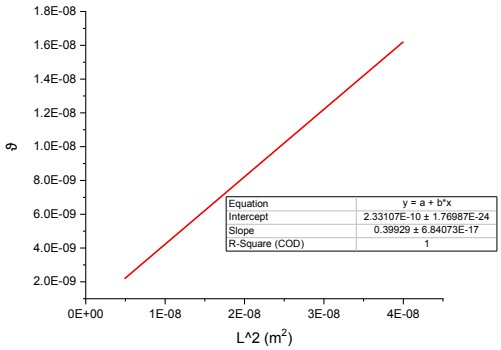

Figure 8. La réponse de ϑ en fonction de carré l'épaisseur du substrat

3. Mesure par thermoreflectance

La méthode d'imagerie par thermoreflectance est basée sur la mesure de la petite variation de la réflectivité de la surface d'un échantillon (ΔR) en fonction de la température (ΔT). La relation entre la variation de la réflectivité relative de la surface (ΔR/R) et la température de surface pour une surface donnée peut être exprimée comme suit :

$$\frac{\Delta R}{R} = C_{th}.\Delta T \qquad (9)$$

Le coefficient de thermoreflectance Cth dépend de la longueur d'onde utilisée et de la nature de la surface à mesurer. Pour la mesure par thermoreflectance, nous utilisons un banc de mesure Microsanj NT220B qui possède une résolution transitoire et une résolution spatiale pouvant atteindre respectivement 50ns et 300nm. Nous utilisons un objectif proche UV avec un grossissement X50 ainsi qu'une LED avec une longueur d'onde de 365nm permettant de traverser la passivation SiNx [6]. Nous imposons une puissance dissipée égale à 0.7W sur un transistor HEMT GaN de la fonderie UMS (8X50µm). La grille possède une longueur de 150nm

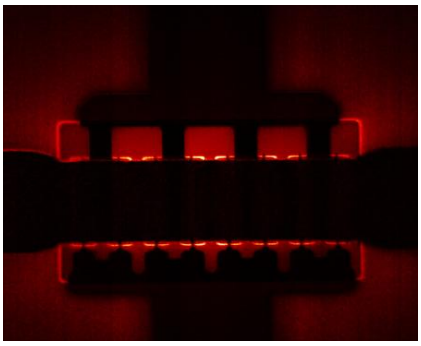

Figure 9. Mesure de thermoreflectance d'un transistor HEMT GaN 8x50µm

Nous mesurons alors une différence de température ΔT = 22°C, la résistance thermique vaut donc :

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{P_{diss}} = 31.4°C/W$$

L'intensité de la couleur rouge sur la fig.9 caractérise l'élévation de la température dans le composant.

4. Résumé

Le tableau 2 présente les résultats de la résistance thermique obtenus par la mesure de thermoréflectance et ceux obtenus par la simulation.

Rth(°C/W)	*TR*	*Equation analytique*
GH15 8x50µm	*31.4 °C/W*	*34.5 °C/W*
GH15 6x50µm	*42.86 °C/W*	*46.02 °C/W*

Tableau 2. Comparaison résultats de mesures et de simulations

Les valeurs mesurées avec la thermoreflectance sont cohérentes avec celles trouvées avec la formule analytique présentée dans ce papier.

Il existe plusieurs constantes de temps thermiques même avec une seule couche 1-D. Les constantes de temps trouvées avec la réduction d'ordre et le calcul analytique présentée dans le travail [5] sont identiques.

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une formule analytique pour estimer la résistance thermique pour une structure simplifiée d'un transistor GaN. Nous avons également proposé une évaluation de la constante de temps la plus longue dépendante du substrat. Cette expression issue d'un ensemble de simulations numériques a été validée par une approche analytique.

Des mesures complémentaires sont en cours sur les aspects dynamiques

Références

[1] Masana, F. A closed form solution of junction to substrate thermal resistance in semiconductor chips. IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. Part A 1996, 19, 539–545

[2] Darwish, A.; Bayba, A.; Hung, H. Thermal Resistance Calculation of AlGaN–GaN Devices. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2004, 52, 2611–2620

[3] K. R. Bagnall et al., doi 10.1109/TCPMT.2014.2299766.

[4] Sommet, R.; Chang, C.; Quere, R.; Dueme, P. Model order reduction of linear and nonlinear 3D thermal finite-element description of microwave devices for circuit analysis. Int. J. RF Microwawe Comput.-Aided Eng. 2005, 15, 398–411

[5] K. R. Bagnall and E. N. Wang, "Transient thermal dynamics of GaN HEMTs," 2016 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2016, pp. 1551-1557, doi: 10.1109/ITHERM.2016.7517733

[6] A. Jakani, R. Sommet, F. Gaillard and J. -C. Nallatamby, "Comparison of GaN HEMTs Thermal Results through different measurements methodologies: Validation with 3D simulation," 2021 27th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/THERMINIC52472.2021.9626486.