HAL
open science

Étude du comportement thermique d'un composant GaN de puissance

Cyrille Gautier, Lionel Hoffmann, Francois Costa, Stéphane Lefebvre

▶ **To cite this version:**

Cyrille Gautier, Lionel Hoffmann, Francois Costa, Stéphane Lefebvre. Étude du comportement thermique d'un composant GaN de puissance. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065191

HAL Id: hal-01065191

https://hal.science/hal-01065191v1

Submitted on 18 Sep 2014

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.

Symposium de Génie Electrique 2014
EF EPF MGE
8-9 juillet 2014, Cachan

Étude du comportement thermique d'un composant GaN de puissance

Cyrille GAUTIER, Lionel HOFFMANN, Stéphane LEFEBVRE, François COSTA

SATIE, ENS Cachan, CNRS, UniverSud, 61 av. du President Wilson, 94 230 Cachan, France

RESUMÉ - Nous nous intéressons dans cet article au comportement thermique des transistors GaN du puissance fabriqués par EPC afin de pouvoir estimer précisément leurs pertes par commutation. Après avoir présenter l'évolution des caractéristiques statiques en fonction de la température, nous détaillons la méthode calorimétrique, associée à de la simulation par éléments finis, que nous avons utilisé pour estimer ces pertes et le modèle thermique simplifié que nous avons validé. Nous avons utilisé ces résultats pour enrichir le modèle de simulation circuit du transistor GaN afin d'accéder efficacement à l'évolution de la température de jonction en simulation.

GaN, Convertisseur de puissance, Modèle thermique

1 Introduction

Les composants GaN de puissance possèdent théoriquement le potentiel de fonctionner à une température de jonction plus élevée que les composants silicium. En raison de la difficulté de réaliser des substrats GaN massifs, les composants GaN de puissance disponibles aujourd'hui sont principalement réalisés par hétéro-épitaxie sur du silicium[**?**]. Dans ce cas, le désaccord de maille cristalline entre le silicium et le GaN ainsi que la différence des coefficients de dilatation entrainent des contraintes mécaniques qui limitent l'utilisation de ces composants à des températures élevées (tableau **??**). Cependant, cette limite n'est pas clairement définie aujourd'hui. Nous nous intéressons dans cet article au comportement thermique des composants GaN ©EPC, et en particulier au modèle 200V - 12A (EPC 2010). Les dimensions des boitiers de ces composants sont très petites (EPC 2010 : 3,554 $\times$ 1,632 $\times$ 0,685 mm), comparées à celles des boitiers classiques, ce qui permet de réduire au maximum les inductances de connexion et d'obtenir une densité de puissance très élevée. Cependant, ces dimensions limitent également les échanges thermiques et l'évacuation de la chaleur. La maitrise du comportement thermique de ces composants est donc essentielle pour définir et mettre en œuvre une solution de refroidissement, afin d'exploiter au mieux son potentiel.

Nous nous sommes intéressé dans une première partie à la variation des caractéristiques statiques ($I_{ds} = f(V_{ds})$) en fonction de la température pour différentes valeurs de V_{gs}. A partir de mesures calorimétriques et de simulations par éléments finis (2D et 3D), nous avons ensuite défini et validé un modèle thermique que nous allons présenter dans une deuxième partie. Enfin nous avons retranscrit en VHDL-AMS le modèle de simulation Spice fourni par EPC et nous l'avons complété afin d'obtenir un modèle électro-thermique. Nous présenterons ce modèle dans la troisième partie, ainsi que la comparaison des résultats obtenus en mesure et en simulation dans le cas d'un bras de pont constitué de deux transistors GaN EPC 2010.

2 Caractéristiques statiques

Les mesures de caractéristiques statiques ont été effectuées à l'aide d'un traceur de caractéristique Agilent B1505 pour différentes températures ambiantes stabilisées (entre 20°C et 150 °C) et différentes valeurs de V_{gs}, en conduction directe (figure **??**) et en conduction inverse (figure **??** et figure **??**).

TABLE 1 – Propriétés thermiques

		Si	GaN	AlN
Mobilité e^-	$m^2\,V^{-1}\,s^{-1}$	1450	2000 (2DEG)	
Tension de claquage	$MV\,m^{-1}$	30	300	120
CTE	$ppm\,°K^{-1}$	2.6	4.5	4.5
Conductivité thermique	$W\,m^{-1}\,°K^{-1}$	130	130	160
Température max de jonction	°K	125	600	

2.1 Conduction directe

En conduction directe, on peut voir que la résistance à l'état passant augmente avec la température, comme dans le cas d'un transistor Mos Silicium, mais qu'elle reste cependant très faible (comprise entre 20 mΩ et 60 mΩ). La mesure de la résistance Rds_{on} peut constituer un bon moyen pour évaluer la température de jonction du transistor.

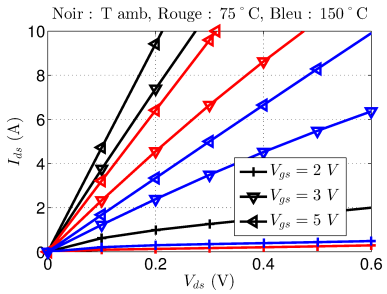

FIGURE 1 – Ids fonction de Vds, conduction directe

2.2 Conduction inverse

En conduction inverse, le comportement du transistor GaN est plus complexe. En effet, il n'existe pas de diode de structure à proprement parler, et la conduction inverse correspond plus au comportement d'une résistance variable en fonction de la tension V_{gs} en série avec une diode. Comme le montre les courbes sur les figures **??** et **??**, cette résistance augmente lorsque V_{gs} passe de −3V à −5V, et elle augmente également avec la température. Ce comportement peut faire apparaitre des tensions inverses en fonctionnement, en particulier pendant les phases de temps mort . Ces tensions, comprises entre −0 8V et −8V suivant la tension de commande V_{gs} appliquée, et la température sont alors à l'origine de pertes supplémentaires.

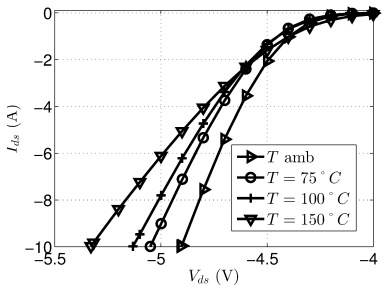

FIGURE 2 – Ids fonction de Vds, $Vgs = -3V$, conduction inverse

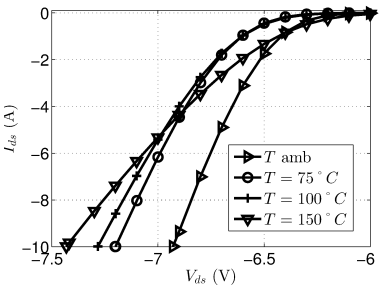

FIGURE 3 – Ids fonction de Vds, $Vgs = -5V$, conduction inverse

3 Modèle thermique

3.1 Méthode calorimétrique

Les composants GaN sont présentés comme ayant des pertes par commutation très faibles comparés aux composants Silicium, du fait d'une résistance à l'état passant Rds_{on} très faible et d'une charge de grille qc également très faible. Afin de caractériser ces pertes, nous avons utilisé une méthode calorimétrique basée sur l'élévation de température dans un cylindre métallique placé au dessus de deux transistors GaN FET montés en bras de pont. Une fine couche de carbone a été placée entre les transistors et le cylindre afin d'assurer un bon contact thermique. En limitant le temps de fonctionnement du bras de pont et donc l'élévation de température, nous pouvons négliger en première approximation les effets de convection et travailler avec un modèle thermique simplifié. Le choix d'une géométrie cylindrique permet d'utiliser une modélisation par éléments finis 2D axi-symétrique rapide (figure **??**) afin d'optimiser le rapport hauteur sur diamètre du cylindre et de vérifier que les effets de convection restent au second ordre.

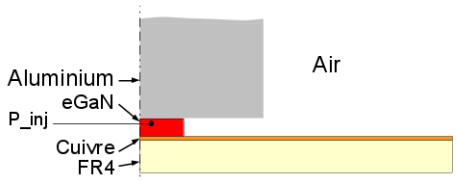

FIGURE 4 – Configuration de la simulation 2D axi-symetrique

3.2 Simulation

La répartition de la température dans l'ensemble pour une injection de puissance (P_{inj}) de 1W pendant 120s est représenté figure **??**. On voit sur cette simulation que la majorité de la chaleur est évacuée par le cylindre malgré le plan de cuivre situé au dessus du PCB. En effet, la résistance thermique du transistor GaN FET Rth_{jb} entre la jonction et le PCB est dix fois supérieure à la résistance thermique Rth_{jc} entre la jonction et la surface supérieure du transistor, qui correspond pourtant en majorité à la résistance du substrat en Silicium (épaisseur $\approx 650nm$). Cela justifie le fait que nous ne tenions pas compte de la convection du plan de cuivre dans le modèle thermique simplifié présenté figure **??**.

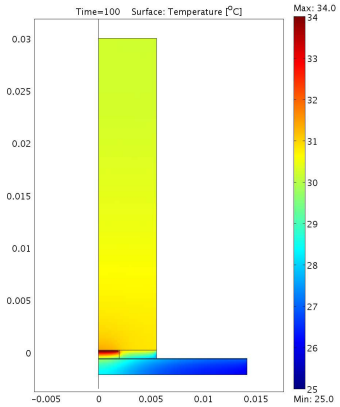

FIGURE 5 – Répartition de la température

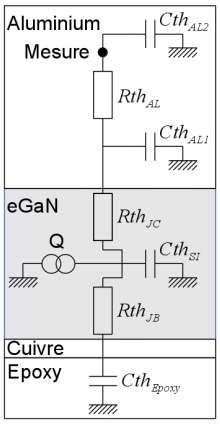

FIGURE 6 – Modèle thermique simplifié

Afin de valider la méthode calorimétrique, nous avons comparé les résultats obtenus en simulation avec les résultats de mesure en utilisant une résistance comme source de puissance. Pour des puissances injectées inférieures à 1W, les résultats présentés figure **??** montrent que les effets de la convection restent négligeables comparés aux effets de conduction et la méthode donne des résultats précis. Pour une puissance injectée de 2W, l'élévation de température est trop rapide et la convection vient modifier les résultats.

Cependant, dans le cas d'un cylindre vertical, cet effet de convection peut être introduit dans la simulation par éléments finis en 2D ou en 3D pour augmenter la plage de validité de la méthode à des puissances dissipées supérieures. À l'issu de cette phase de calibration, nous avons finalement opté pour un cylindre de rayon $r = 5mm$ et de hauteur $h = 15mm$, avec une mesure située à 75% de la hauteur du cylindre. Afin de limiter la montée en température, nous avons également décider de travailler sur des temps de mesure de 30s. Les valeurs utilisées pour le modèle thermique simplifié sont présentées dans le tableau **??**.

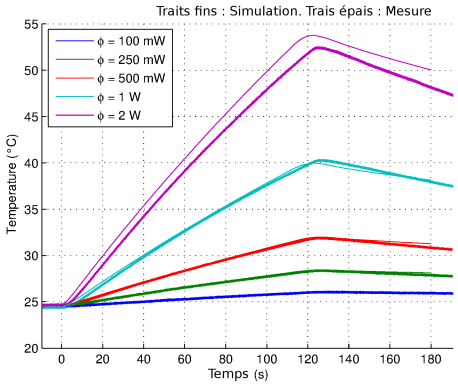

FIGURE 7 – Comparaison entre les résultats de simulation et de mesure

TABLE 2 – Modèle thermique

Flux de chaleur (Q)	1,00	W			
Rth_{jb}	15,0	K/W	Cth_{Epoxy}	1,29	J/K
Rth_{jc}	1,8	K/W	Cth_{Al1}	4,12	J/K
Rth_{Al}	1,3	K/W	Cth_{Al2}	1,54	J/K

4 Modèle électro-thermique

Nous détaillerons dans l'article complet l'utilisation des résultats du modèle thermique simplifié pour venir enrichir le modèle de simulation spice fourni par EPC et retranscrit en VHDL-AMS. La comparaison entre les résultats de simulation et les résultats de mesure seront également présentés.

5 Conclusion

L'intérêt de la méthode calorimétrique utilisée et de pouvoir accéder à une estimation précise des pertes dans les transistors GaN en fonctionnement pour une configuration précise. La limite réside dans l'impossibilité de laisser passer un régime transitoire puisque la durée de fonctionnement doit rester très limitée dans le temps. Nous l'avons par exemple utilisée pour déterminer l'effet de la variation du temps mort dans un bras de pont en GaN sur les pertes. Le modèle électro-thermique utilisé en simulation permet d'estimer l'évolution de la température de jonction en fonction du mode de fonctionnement et ainsi de comparer a priori les rendements entre différentes structures.

Références

[1] J.W. Chung, K. Ryu, B. Lu and Tomas Palacio, "GaN-on-Si technology, a new approach for advanced devices in energy and communications", *Solid-State Device Research Conference*, 2010 IEEE, pp. 52-56.

[2] T. Imada, M. Kanamura and T. Kikkawa, "Enhancement-mode GaN MIS-HEMTs for power supplies", *Power Electronics Conference*, 2010 IEEE, pp. 1027-1033.

[3] Milisav Danilovic, Zheng Chen, Ruxi Wang, Fang Luo, Dushan Boroyevich and Paolo Mattavelli, "Evaluation of the Switching Characteristics of a Gallium-Nitride Transistor", *Energy Conversion Congress and Exposition*, 2011 IEEE, pp. 2681-2688.

[4] Hirokatsu Umegami, Masayoshi Yamamoto, Yu Nozaki and Osamu Machida, "A Novel High Efficiency Gate Drive Circuit for Normally Off Type GaN-FET", *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012 IEEE, pp. 2954-2960.

[5] Thomas LaBella, Ben York, Chris Hutchens and Jih-Shen Lai, "Dead Time Optimization through Loss Analysis of an Active-Clamp Flyback Converter Utilizing GaN Devices", *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2012 IEEE, pp. 3882-3889.