

Titre Thèse	Méthode de conception de convertisseurs haute fréquence en utilisant des modèles électrothermiques des composants GaN	
Title	Design method of high frequency converters using electrothermal models of GaN components	
Directeur	IDIR Nadir	E-mail : nadir.idir@univ-lille.fr
(Co)-Directeur	DE JAEGER Jean-Claude	E-mail : jean-claude.de-jaeger@univ-lille.fr
(Co)-Encadrant (s)	VIDET Arnaud	E-mail : arnaud.videt@univ-lille.fr
Laboratoire(s)	L2EP / IEMN	Web 1: l2ep.univ-lille.fr/ Web 2: https://www.iemn.fr/
Groupe(s)	ELECTRONIQUE DE PUISSANCE/ PUISSANCE	Web 1: https://l2ep.univ-lille.fr/groupe-de-recherche/equipe-electronique-de-puissance/ Web2: https://www.iemn.fr/la-recherche/les-groupes/groupe-puissance
Financement demandé	Contrat Doctoral Etablissement Région – Autre <input type="checkbox"/> Préciser :	ULille <input type="checkbox"/> Centrale Lille <input type="checkbox"/> Yncrea <input type="checkbox"/> Co-financement acquis Oui / non <input type="checkbox"/> Préciser :
Financement acquis ? <input checked="" type="checkbox"/> Financement partiellement acquis ? <input type="checkbox"/>	Contrats de Recherche <input checked="" type="checkbox"/> Préciser : IPCEI – ST Microelectronics 2025	Autre <input type="checkbox"/> Préciser :

Méthode de conception de convertisseurs haute fréquence en utilisant des modèles électrothermiques des composants GaN

Contexte :

Le développement des convertisseurs embarqués dans les véhicules électriques nécessite l'amélioration des performances énergétiques (augmentation du rendement) mais également la réduction du poids et du volume des systèmes de conversion d'énergie. Ceux-ci sont basés sur des composants de puissance à grand gap (GaN) permettant de commuter à haute fréquence. Les caractéristiques physiques des composants GaN permettent en effet d'obtenir des performances électriques supérieures aux composants en silicium. Grâce à l'utilisation des composants GaN, nous pouvons réaliser des convertisseurs statiques qui commutent à des fréquences de l'ordre du Mégahertz. Les commutations rapides de ces composants permettent de réduire les pertes ce qui permet l'augmentation du rendement du système. Le fonctionnement en haute fréquence permet une réduction des dimensions des composants passifs (bobines, transformateur ...) ce qui aura pour conséquence une réduction de l'encombrement (poids et volume) des systèmes de conversion d'énergie embarqués. L'objectif de cette thèse est d'étudier l'ensemble d'une chaîne de conversion d'énergie à base de composants GaN partant du composant jusqu'au système. Ce projet de recherche sera réalisé en collaboration avec l'entreprise STMicroelectronics.

Résumé :

Ce sujet de thèse entre dans le cadre d'une collaboration entre les équipes Electronique de Puissance du L2EP et Composants et Dispositifs Microondes de Puissance de l'IEMN qui ont des compétences complémentaires. Il a pour objectif de développer une chaîne complète de compétences allant de la caractérisation et la modélisation électrothermique des composants de puissance GaN (diodes GaN et transistors GaN-HEMT) jusqu'à la conception et la réalisation d'un convertisseur haute fréquence. La technologie GaN est particulièrement bien adaptée pour la conception et la fabrication de convertisseurs en électronique de puissance ayant une fréquence de commutation élevée ($> 1\text{MHz}$). La conséquence directe est une augmentation de la densité de puissance permettant ainsi de réduire l'encombrement des convertisseurs statiques ce qui constitue un critère très important pour les systèmes embarqués (avions, automobile...)

Il s'agit de développer des méthodes de caractérisation de composants packagés et non packagés basées sur des caractérisations statiques DC et dynamiques RF large bande utilisant la détermination des paramètres S mesurés à l'aide d'un analyseur de réseaux vectoriel (VNA). Cela nécessite de mettre en œuvre des cellules de caractérisation et des circuits spécifiques afin d'avoir des accès 50Ω . De plus, ces mesures devant être faites à haute tension, des bias ayant la bande passante suffisante et supportant de fortes puissances doivent être utilisés.

A partir de la caractérisation, le travail va consister en la détermination du schéma équivalent des composants basée sur les éléments extrinsèques puis intrinsèques ainsi qu'à réaliser des mesures thermiques. L'impact du type de boîtier et de report sur les performances des dispositifs sera ainsi étudié.

L'objectif est la détermination de modèles électrothermiques des composants valables sur une large bande de fréquences pour la conception de convertisseurs fonctionnant à des fréquences supérieures à 1MHz . Dans ce but, des logiciels de type circuit (ADS ou SPICE) vont être utilisés. De plus, les effets de gate lag et drain lag des transistors à partir de mesures pulsées vont être effectuées à haute tension et on va analyser et modéliser les effets de « current collapse » apparaissant sur les diodes et transistors en commutation. Des modèles de résistances dynamiques permettant la détermination des pertes par conduction vont ainsi être déterminés.

Les modèles développés seront utilisés dans la simulation pour la conception et l'optimisation puis la réalisation de convertisseurs HF pour les applications spécifiques. Dans ce but, il est nécessaire d'optimiser la connectique en technologie hybride afin de minimiser les inductances parasites et les perturbations électromagnétiques. Le circuit imprimé (PCB) devra tenir compte de plusieurs contraintes liées notamment aux faibles dimensions des boîtiers des composants GaN. Ainsi, il est nécessaire de bien tenir compte de la dissipation thermique, en fonction du type de boîtiers, ce qui constitue un verrou particulièrement crucial. De plus, la conception doit tenir compte des contraintes en termes de CEM (Compatibilité Électromagnétique). Ce problème est également crucial compte tenu de la limitation nécessaire du rayonnement du convertisseur ayant une fréquence de commutation élevée associée à des courants et tensions importants.

La dernière étape consiste à réaliser un convertisseur commutant à 1MHz en technologie GaN. Une caractérisation électrique, thermique et électromagnétique (CEM) du convertisseur sera réalisée.

Design method of high frequency converters using electrothermal models of GaN components

Context:

The development of embedded converters in electric vehicles will require improving energy performance (increasing efficiency) but also reducing the weight and volume of energy conversion systems. These are based on wide bandgap power (GaN) components for high frequency switching. The physical characteristics of GaN components make it possible to obtain higher electrical performance than silicon components. Thanks to the use of GaN components, static converters switching at frequencies of the order of Megahertz can be fabricated. The rapid switching of these components makes it possible to reduce the losses which allows the increase of the

system efficiency. The increase in the operating frequency permits a reduction in the dimensions of the passive components (inductances, transformer, etc.), which will result in a reduction in the size (weight and volume) of embedded energy conversion systems. The objective of this thesis is to study the entire energy conversion chain based on GaN components, starting from the device to the system. This research project will be carried out in collaboration with the STMicroelectronics Company.

Summary:

This thesis subject is part of a collaboration between Power Electronics team of the L2EP and the Microwave Power Components and Devices team of the IEMN, which have complementary know-hows. Its objective consists to develop a complete chain of skills ranging from the characterization and modeling of GaN power components (GaN diodes and GaN-HEMT transistors) to the design and making of a high-frequency power converter. GaN technology is particularly well suited for the design and manufacture of power electronics converters with a high switching frequency ($> 1\text{MHz}$). The direct consequence is an increase in power density, thus making it possible to reduce the size of static converters, which is a very important criterion for embedded systems (aircraft, automobile, etc.)

The aim is to develop characterization methods for packaged and non-packaged components based on static DC and dynamic broadband RF characterizations using the determination of the S-parameters measured using a Vector Network Analyzer (VNA). This requires the implementation of characterization cells and specific circuits in order to have 50Ω access. In addition, because these measurements must be made at high voltage, biases having sufficient bandwidth and supporting high powers must be used.

From the characterization, the work will consist in determining the equivalent scheme of the components based on the extrinsic and intrinsic elements as well as in carrying out thermal measurements. The impact of the type of package and transfer on the performance of the devices will thus be studied.

The objective is to determine electrothermal models of components valid over a wide frequency band for the design of converters operating at frequencies above 1MHz . For this purpose, circuit-type softwares (ADS or SPICE) will be used. In addition, the effects of gate lag and drain lag of transistors will be performed at high voltage from pulsed measurements and the effects of "current collapse" appearing on diodes and transistors in switching operation will be modeled and analyzed. Models of dynamic resistances permitting the determination of losses by conduction will thus be determined.

The models developed will be used in the simulation for the design and optimization and then the realization of HF converters for specific applications. To this end, it is necessary to optimize the connectors in hybrid technology in order to minimize parasitic inductances and electromagnetic disturbances. The printed circuit (PCB) will have to consider several constraints related in particular to the small dimensions of the packages of the GaN components. Thus, it is necessary to take heat dissipation into account, depending on the type of package, which constitutes a particularly crucial bottleneck. In addition, the design must consider constraints in terms of EMI (Electromagnetic Interferences). This problem is also crucial given the necessary limitation of the radiation of the converter having a high switching frequency associated with large currents and voltages.

The last step will consist in making a converter switching at 1MHz in GaN technology. An electrical, thermal and EMI characterization of the converter will be carried out.

Bibliography

- [1] Quentin Fornasiero, Nicolas Defrance, Sylvie Lepilliet, Vanessa Avramovic, Yvon Cordier, Eric Frayssinet, Marie Lesecq, Nadir Idir, and Jean-Claude De Jaeger, "Fabrication, and Direct Current and cryogenic analysis of SF 6 -treated AlGaIn/GaN Schottky barrier diodes", Journal of Vacuum Science & Technology B 41, Janvier 2023, <https://hal.science/hal-03917965>

- [2] Martin Doublet, Nicolas Defrance, Etienne Okada, Loris Pace, Thierry Duquesne, Bouyssou Emilien, Arnaud Yvon, Nadir Idir and Jean-Claude De Jaeger, "Investigation of current collapse mechanism on AlGaN/GaN 2 power diodes", MDPI, Electronics, April 2023, <https://doi.org/10.3390/electronics12092007>
- [3] Quentin Fornasiero, "Fabrication et caractérisation de transistors HEMT et de diodes à base de GaN pour la conversion de tension DC-DC en électronique de puissance", Thèse de doctorat, Université de Lille, 14 décembre 2022.
- [4] Quentin Fornasiero, Nicolas Defrance, Marie Lesecq, Eric Frayssinet, Yvon Cordier, Florian Chevalier, Nadir Idir, Jean-Claude de Jaeger, "Fluorine-based plasma treatment for AlGaN/GaN e-mode HEMTs and low on-voltage diodes", Wocsdice Exmatec 2021, June 2021, Bristol, United Kingdom. pp.50-52, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03275589>
- [5] Loris Pace, Nadir Idir, Thierry Duquesne, Jean-Claude De Jaeger, "Parasitic Loop Inductances Reduction in the PCB Layout in GaN-Based Power Converters Using S-Parameters and EM Simulations", Energies - MDPI, 2021, Vol. 14, N°. 5, p. 17, <https://doi.org/10.3390/en14051495>
- [6] Martin Doublet, Nicolas Defrance, Loris Pace, Etienne Okada, Thierry Duquesne, Emmanuel Collard, Arnaud Yvon, Nadir Idir, Jean-Claude De Jaeger, "Characterization and modeling of 650V GaN diodes for high frequency power conversion", IEEE Design Methodologies Conference (DMC 2021), p. 6, ISBN 978-0-7381-1301-2, 7, <https://doi.org/10.1109/DMC51747.2021.9529931>
- [7] Loris Pace, Florian Chevalier, Arnaud Videt, Nicolas Defrance, Nadir Idir, Jean-Claude De Jaeger, "Electrothermal Modeling of GaN Power Transistor for High Frequency Power Converter Design", 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'20 ECCE Europe), Lyon, France, 2020, pp. 1-10, <https://doi.org/10.23919/EPE20ECCEurope43536.2020.9215782>
- [8] Loris Pace, Nicolas Defrance, Arnaud Videt, Nadir Idir, Jean-Claude De Jaeger, "Extraction of Packaged GaN Power Transistors Parasitics Using S-Parameters", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 66, N°. 6, p. 2583-2588, 4, 2019, <https://doi.org/10.1109/TED.2019.2909152>
- [9] Loris Pace, Nicolas Defrance, Arnaud Videt, Nadir Idir, Jean-Claude De Jaeger, "A Method to Determine Wide Bandgap Power Devices Packaging Interconnections", 23th IEEE Workshop on Signal and Power Integrity (SPI 2019), 18-21 June 2019, Chambéry. <https://doi.org/10.1109/SaPIW.2019.8781641>
- [10] Loris Pace, Nicolas Defrance, Arnaud Videt, Nadir Idir, Jean-Claude De Jaeger, "S-parameters characterization of GaN HEMT power transistors for high frequency modeling", PCIM Europe 2018; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2018, pp. 1-8.
- [11] Loris Pace, Nicolas Defrance, Arnaud Videt, Nadir Idir, Jean-Claude De Jaeger, "Méthode de caractérisation des transistors GaN pour la conception des convertisseurs statiques hautes fréquences", Symposium de Génie Electrique (SGE) 2018, Nancy.