



**HAL**  
open science

# METHODES ET OUTILS EXPERIMENTAUX DEDIES A L'ANALYSE COMPORTEMENTALE DES DISPOSITIFS ACTIFS DES HAUTES FREQUENCES

Jean-Guy Tartarin, Laurent Bary, Alexandre Rumeau, Bernard Franc, Laurent  
Escotte, Jacques Graffeuil

## ► To cite this version:

Jean-Guy Tartarin, Laurent Bary, Alexandre Rumeau, Bernard Franc, Laurent Escotte, et al.. METHODES ET OUTILS EXPERIMENTAUX DEDIES A L'ANALYSE COMPORTEMENTALE DES DISPOSITIFS ACTIFS DES HAUTES FREQUENCES. TELECOM & JFMMA 2015, May 2015, Meknes, Maroc. <hal-02088182>

**HAL Id: hal-02088182**

**<https://laas.hal.science/hal-02088182v1>**

Submitted on 2 Apr 2019

**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.



HAL Authorization

---

## METHODES ET OUTILS EXPERIMENTAUX DEDIES A L'ANALYSE COMPORTEMENTALE DES DISPOSITIFS ACTIFS DES HAUTES FREQUENCES

J.G. Tartarin <sup>(1)</sup>, L. Bary <sup>(1)</sup>, A. Rumeau <sup>(1)</sup>, B. Franc <sup>(1)</sup>, L. Escotte<sup>(1)</sup>, J.Graffeuil <sup>(1)</sup>,

(1) LAAS-CNRS, University of Toulouse (UPS), F-31031, Toulouse, France

### Résumé:

Ces travaux synthétisent des études basées sur l'exploitation d'un ensemble de moyens expérimentaux développés spécifiquement au sein de notre laboratoire, et de bancs de test du commerce, dans l'objectif de l'analyse de dispositifs actifs (transistors) dédiés à des applications hautes fréquences. Ces outils permettent des analyses orientées 'analyse de processus de défaillance', que nous illustrerons au travers de cas d'étude de filières à grande bande interdite GaN, ou encore des analyses spécifiques aux applications 'récepteurs faible bruit'. Les bancs de mesure relèvent de la métrologie du bruit basse fréquence, des mesures électriques impulsives, mesures DLTS. Dans le second cas, les outils de métrologie du bruit haute fréquence permettent d'analyser les procédés technologiques en vue de l'optimisation des performances HF et en bruit des transistors pour la réalisation de circuits faible bruit: un ensemble de bancs unique en Europe nous permet de mesurer également le bruit de phase en oscillation et résiduel, le bruit HF sous signal de pompe.

**Mots clés:** bruit BF, bruit HF, bruit de phase, mesures transitoires, métrologie des pièges.

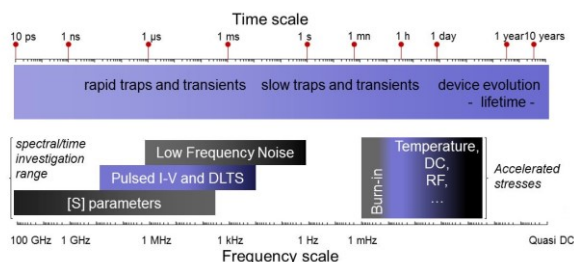
### 1. COMPLEMENTARITE DES MESURES ELECTRIQUES NON-INVASIVES

Les outils de caractérisation des transistors dédiés aux applications des hautes fréquences permettent de mesurer leurs caractéristiques statiques et dynamiques, bas niveau ou fort niveau. Ces mesures peuvent être exploitées dans un objectif d'amélioration des technologies en termes de performances ou encore de fiabilité, et de proposer des modèles exploitables par les plateformes de simulation pour concevoir des circuits hautes fréquences. La panoplie des outils de mesure est large, et permet d'appréhender les effets extrinsèques de mécanismes intrinsèques souvent complexes. Dans le meilleur des cas, une procédure de mesure sommaire permettra d'obtenir les données et modèles nécessaires à la réalisation du module visé (mesures DC, mesures de

paramètres [S], conception d'un amplificateur bas niveau), mais les nouvelles technologies font généralement preuve de moins de docilité pour atteindre les buts visés. De nombreux laboratoires de recherche développent ainsi des expertises souvent spécifiques sur des domaines, des technologies ou des méthodes d'analyse expérimentales. L'objectif visé par notre équipe de recherche consiste à proposer des outils de caractérisation fortement orientés autour de la métrologie du bruit électrique, dans le domaine temporel ou spectral afin d'accéder à des informations intrinsèques, corpusculaires et qui impactent parfois les performances ou la robustesse du composant. L'avantage de ces mesures non destructives réside en la possibilité de suivre le composant (et ses performances électriques) lors de l'application d'une contrainte.

Certaines technologies font état de pièges couvrant des gammes spectrales (ou de constantes de temps) allant de la nanoseconde jusqu'à plusieurs minutes. Les techniques de mesures

recensées dans la figure 1 permettent de mieux appréhender les interférences éventuelles entre une mesure et l'évolution électrique d'un composant. De multiples pièges ont été décelés sur des dispositifs HEMT AlInN/GaN [1] dans la gamme des microondes (jusqu'à 1 GHz), dont les effets peuvent être particulièrement néfastes pour la conception d'amplificateurs (Radar pulsé) ou encore d'oscillateurs. Une caractérisation et une modélisation conventionnelles à base de paramètres [S] peut aboutir à une conception non-représentative de la fonction électrique, de par la non-prise en considération des pièges.



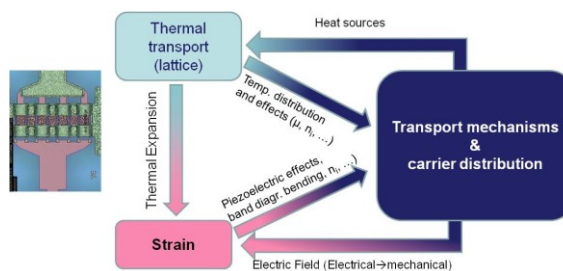
**Figure 1.** Gammes spectrales et temporelles des principaux outils de caractérisation électrique, et des pièges ou défauts recensés dans les dispositifs [2]

Le bruit d'un composant est un indicateur de premier ordre dès qu'il s'agit de dimensionner un système électronique : le bruit de fond permet d'établir la valeur basse de la dynamique d'un signal, tandis que le bruit de phase d'un oscillateur sera déterminant pour réaliser des synthétiseurs à haute pureté spectrale pour les systèmes à haut débit. Enfin, le bruit basse-fréquence est un outil pouvant à la fois servir des études sur la conversion non-linéaire des sources basse-fréquence des oscillateurs, mais peut être employé pour suivre l'évolution des défauts dans le cas d'analyses de fiabilité. Ce papier évoquera dans une première partie l'exploitation de certains moyens expérimentaux dédiés à l'analyse des défauts et de la robustesse de technologies à grande bande interdite, tandis que dans une deuxième partie sera abordée la métrologie du bruit HF pour l'optimisation de filières faible bruit (AlInN) et pour la conception d'amplificateurs faible bruit en bande Ka.

## 2. METHODES D'ANALYSE DES DEFAUTS DANS LES HEMT ALGAN/GAN

Différentes filières de composants ont été portées à l'étude, tant sur des filières bipolaires SiGe, III-V, que sur des filières à effet de champ. Différents bancs expérimentaux ont été développés au laboratoire, présentant une très grande

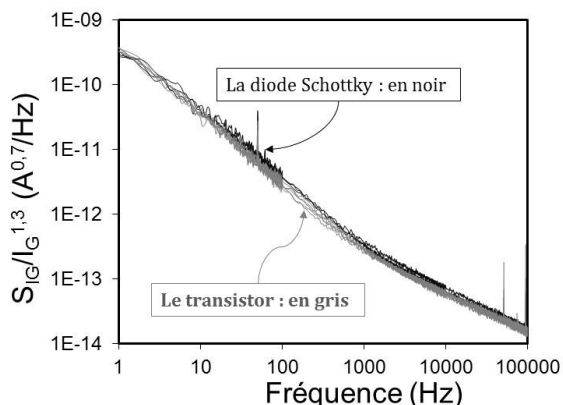
sensibilité (typiquement avec un plancher de mesure de l'ordre de  $-210\text{dBV}^2/\text{Hz}$ , et couvrant une gamme de 1Hz à 100MHz)[3]. Les filières GaN à grande bande interdite proposent des cas d'étude parmi les plus complexes dans la mesure où ces dernières font intervenir des phénomènes électro-thermo-mécaniques selon les interactions identifiées en figure 2.



**Figure 2.** interactions électro-thermo-mécaniques liées aux dispositifs AlGaIn/GaN : l'aspect électro-mécanique étant lié au fort caractère piezoélectrique de la structure [4]

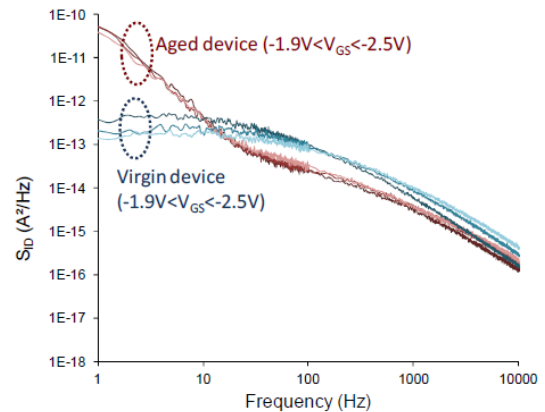
Il est dès lors important de définir une procédure de caractérisation précise afin de valider la représentativité des mesures : par exemple, une caractérisation 'DC' d'une simple diode Schottky peut présenter de fortes variations sur le courant inverse selon le sens du balayage des tensions ou encore selon le temps d'intégration choisi (rapide/moyen/lent). En mode transistor, ces effets peuvent être exacerbés par la thermique à laquelle est soumis le transistor, et la dynamique de charges variables dans le temps apparaissant en différentes zones du dispositif. L'utilisation de moyens de mesure croisés (temporelles pulsées, bruit BF, paramètres [S] bas niveau ou non-linéaires...) permet de mieux appréhender certains mécanismes électriques. La mesure du bruit basse-fréquence est reconnue pour apporter des informations quant à la nature des défauts de nature corpusculaire voire leur localisation ou leur niveau d'énergie. Des études sur des filières HEMT AlGaIn/GaN et AlInN/GaN ont permis d'analyser les mécanismes de conduction de grille en mode diode et en mode transistor saturé. Nous avons notamment mis en évidence une origine commune des pièges actifs (et de fait démontré des trajets de conduction identiques entre grille et source en modes diode et transistor, figure 3) : ce résultat, relié à une modélisation électrique des courants de grille, permet de mieux distinguer la part de la commande de grille dans la dégradation des transistors AlGaIn/GaN. En effet, la dégradation des caractéristiques d'un transistor HEMT AlGaIn/GaN peut avoir de nombreuses manifestations et origines comme en atteste la

nombreuse littérature associée à ce domaine d'étude [5]. Cependant, certains effets de réduction du courant  $I_{DS}$  (donc de la densité de porteurs  $n_i$ ) peuvent être attribués à une évolution de la zone de commande (i.e. grille Schottky) et non pas à des défauts du gaz 2DEG ou des états de passivation comme le défendent certains travaux. Seule une approche exhaustive permet de discerner correctement la part imputable au canal, à la commande, à la passivation ou aux accès ohmiques du composant : une cartographie en polarisation permet de balayer l'ensemble des conditions (courant constant, extension de la zone de charge d'espace constante, ...) [2], tandis qu'une étude sur des développements de grille variables (largeur, longueur et nombre de doigts) permettra d'identifier des pièges de volumes ou de surface lorsque ces composants sont disponibles. Enfin, des manipulations croisées (temporelles pulsées, harmonique sous polarisation DC, électrothermiques, ou thermiques de type DLTS, mesures en thermographie IR Raman, OBIRCH) peuvent fournir des résultats complémentaires pertinents [6][7][8][9].



**Figure 3.** Densités spectrales de bruit en courant de grille normalisé : en mode diode ( $-9V \leq V_{GS} \leq -3V$ ) et en mode transistor ( $-9V \leq V_{GS} \leq 2V$ , avec  $V_{th} = 4.5V$ )

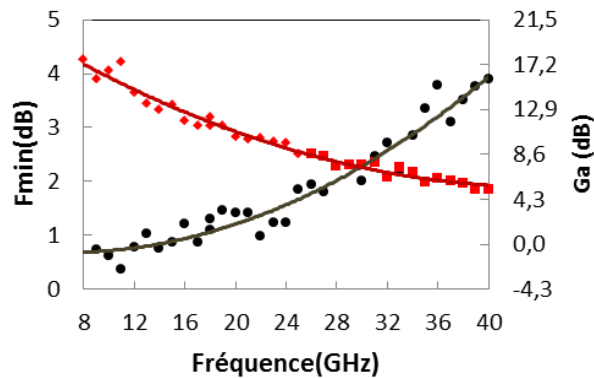
La métrologie et l'analyse des défauts dans les composants actifs est un domaine extrêmement varié, qui nécessite une grande rigueur dans l'approche adoptée pour analyser ces phénomènes. L'exploitation des résultats concerne tout autant la conception de circuits non-linéaires faible bruit que celui de la maturation d'une technologie, jusqu'à sa qualification en fiabilité. La définition et le respect d'une procédure de mesure permet d'assurer le caractère interprétable des données recueillies. La mesure d'un composant témoin à chaque étape critique est indispensable pour lever l'indétermination sur un effet invasif éventuel du banc de mesure.



**Figure 4.** Densités spectrales de bruit en courant de drain en mode transistor (dispositifs HEMT AlGaIn/GaN vierges et vieillis) [2]

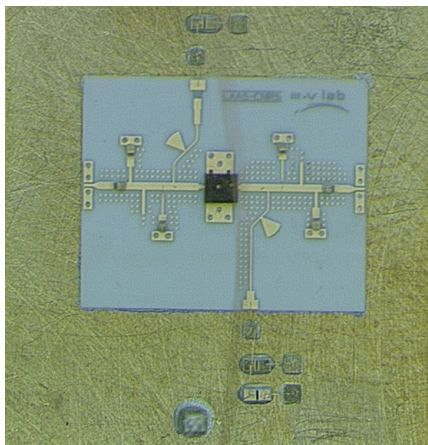
### 3. METROLOGIE DU BRUIT HF POUR LA CONCEPTION DE LNA ROBUSTES

Le bruit HF est pour sa part exploité pour améliorer les technologies dévolues à l'amplification faible bruit (LNA : Low Noise Amplifier). Le banc de caractérisation développé permet des mesures de facteur de bruit sous  $50\Omega$  ( $NF_{50}$ ) et des quatre paramètres de bruit (le facteur de bruit minimum  $NF_{min}$ , la résistance équivalente de bruit  $R_n$  et le coefficient de réflexion optimum de bruit  $\Gamma_{opt}$  exprimé en module-phase) sur une gamme allant de 1GHz à 50 GHz (couverture en plusieurs bandes). La métrologie du bruit HF permet d'identifier les géométries et points de repos optima, d'identifier les sources de bruit qui peuvent être réduites afin de converger vers une technologie faible bruit dédiée à la réception des signaux HF. Les transistors bipolaires à hétérojonction (TBH) autorisent une modélisation aisée des paramètres de bruit HF dès lors que l'on dispose d'un modèle électrique réaliste et précis, en attribuant les paramètres de bruit à chaque élément électrique bruyant [10]. Dans le cas des transistors à effet de champ, cette modélisation n'est pas aussi directe et la métrologie du bruit est nécessaire dans le processus de modélisation [11]. Nos travaux sur la filière AlInN/GaN ont permis d'identifier les versions technologiques les plus avantageuses pour des applications LNA à 30 GHz. La figure 5 illustre l'évolution fréquentielle du facteur de bruit minimum et du gain associé d'un transistor HEMT  $2 \times 75\mu m$  (longueur de grille  $0.15\mu m$ ) entre 8 GHz et 40 GHz.



**Figure 5.** Facteur de bruit minimum et gain associé d'un HEMT AlInN/GaN  $2 \times 75 \mu\text{m}$  (longueur de grille  $0.15 \mu\text{m}$ ) polarisé sous  $V_{DS}=6V$  et  $I_{DS}=20mA$

Des études de bruit HF en régime non-linéaire (@ 7.5GHz) ont également été menées sous signal de pompe HF (@ 10GHz) sur les composants retenus pour la conception de LNA robustes. Une forte dégradation du facteur de bruit est relevée pour des signaux de pompe inférieurs au point de compression du dispositif testé (+2dB sur le facteur de bruit @  $P_{1dB}$ ). Ceci s'explique par la contribution du bruit (large bande) qui s'ajoute au signal de pompe pour compresser le transistor à des niveaux de puissance RF plus bas. Cette étude permet de dimensionner correctement les LNA en termes de puissance d'entrée afin de s'affranchir du risque de saturation et d'aveuglement des amplificateurs de réception soumis à des signaux de brouillage.



**Figure 6.** Amplificateur faible bruit hybride mono-étage pour applications robustes @30GHz, en technologie AlInN/GaN

La figure 6 représente un amplificateur LNA mono-étage en bande Ka, présentant un facteur de bruit de 3.5dB entre 29 et 31 GHz (résultat à l'état de l'art), et qui a été soumis à des contraintes RF @ 30GHz. Des versions MMIC ont également été simulées en version mono-étage (études de

robustesse) et trois étages (gain de 20dB et facteur de bruit de 3.2dB).

## CONCLUSION

La métrologie du bruit de fond linéaire et non-linéaire représente une discipline qui sert des objectifs aussi bien tournés vers les améliorations des technologies (optimisation des technologies, études de robustesse en vue de leur qualification) que vers la conception de modules à faible seuil de détection ou à fort débit (LNA et oscillateurs à haute pureté spectrale respectivement). Nous avons synthétisé dans ce papier quelques résultats organisés autour des filières HEMT à grande bande interdite AlGaIn/GaN et AlInN/GaN, respectivement pour des analyses de fiabilité et pour la conception d'amplificateurs de réception robustes, avec des résultats à l'état de l'art.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les différents partenaires avec lesquels nous avons travaillé, et qui nous ont permis de mettre en œuvre de nouvelles techniques expérimentales ou d'élargir notre gamme d'outils de caractérisation en bruit : Thales Alenia Space, le CNES, Continental nous ont accompagné dans cette démarche. Nous remercions également nos partenaires industriels qui nous ont fait confiance en nous proposant l'étude de leurs filières technologiques (UMS, III-V Lab, ST-Microelectronics, IBM, ...), ainsi que nos collègues du laboratoire, doctorants ou partenaires académiques.

## RÉFÉRENCES

- [1] S. D. Nsele et al., IEEE Trans. Electron Devices, vol. 60, no. 4, pp. 1372-1378, 2013.
- [2] J.G. Tartarin et al., IWS 2013, China, 4p.
- [3] L. Bary, Thèse Toulouse III, 2011.
- [4] J.G. Tartarin at JNMC&JNTE'2013 round table
- [5] R. Menozzi, COMMAD 2008 pp.44-50
- [6] S. Karboyan et al., IEEE-MTT-S IMS 2013, 4p.
- [7] S. Karboyan et al., Microelectronics Reliability Journal, Elsevier, Vol. 53 issues 9-11, Sept-Nov. 2013, pp. 1491-1495.
- [8] M. Kuball et al., IEEE MTT-S IMS 2006 pp.1339-1342.
- [9] J.G. Tartarin, ICNF 2011 6p.
- [10] J.G. Tartarin et al., EuMC-98, 4p.
- [11] G. Dambrine et al., IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, Vol.46, no. 9, pp.1231-1236, September 1998.