Modélisation non linéaire en bruit phase de transistors TBH SiGe

Sébastien Gribaldo, Olivier Llopis

▶ **To cite this version:**

Sébastien Gribaldo, Olivier Llopis. Modélisation non linéaire en bruit phase de transistors TBH SiGe. Journées Nationales Micro-ondes 2007 (JNM 2007), May 2007, Toulouse, France. pp.187. hal-00255671

HAL Id: hal-00255671
https://hal.science/hal-00255671

Submitted on 13 Feb 2008

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.

15èmes Journées Nationales Microondes
23-24-25 Mai 2007 Toulouse

Modélisation non linéaire en bruit phase de transistors TBH SiGe

S. Gribaldo, O. Llopis
LAAS-CNRS, 7 av. du Colonel Roche, 31077 Toulouse, France
gribaldo@laas.fr,llopis@laas.fr

I. Résumé

Ce papier présente une modélisation non linéaire en bruit d'un transistor bipolaire SiGe. L'implémentation de sources de bruit non linéaires dans le modèle du transistor est décrite. Ce modèle s'appuie sur l'observation d'un comportement non linéaire de la source de bruit en tension extrinsèque en parallèle à la jonction base émetteur. La validation de ce modèle est effectuée grâce à la mesure du bruit de phase du transistor étudié dans différentes configurations de polarisation et de puissance.

Ce modèle a permis la conception d'un amplificateur à faible bruit de phase pour la réalisation d'un oscillateur à très haute pureté spectrale fonctionnant à 10 GHz. Cet amplificateur à deux étages a été conçu en s'appuyant sur le modèle précédent. Les performances obtenues sont d'un très bon niveau, en effet le gain est égal à 8.2 dB et le bruit de phase à 100 kHz de la porteuse de -165 $dBrad^2.Hz^{-1}$.

II. Introduction

L'oscillateur est un circuit non-linéaire particulièrement difficile à modéliser en bruit. Deux types de bruit contribuent au bruit de phase en sortie : le bruit haute fréquence (HF) et le bruit basse fréquence (BF) converti autour de la porteuse. Le fonctionnement non linéaire complique la modélisation de la première composante, très sensible aux effets de compression. C'est toutefois sur la seconde, et plus particulièrement sur le bruit en 1/f, que les problèmes les plus complexes se posent. Le débat scientifique s'est focalisé ces dernières années sur la façon de prendre en compte les effets non linéaires sur les sources de bruit basse fréquence et la principale question posée est la suivante : la source de bruit doit elle être considérée comme une non linéarité ou est elle simplement affectée par les non linéarités situées à son voisinage ? Cette étude propose un modèle pour le cas du transistor bipolaire SiGe, et démontre l'efficacité de ce modèle sur le bruit de phase d'un amplificateur. La configuration "amplificateur" est en effet plus rigoureuse pour mener des comparaisons théorie-expérience, en autorisant le test du modèle pour différentes puissances d'entrée, du régime linéaire jusqu'à la compression. Un exemple de conception d'amplificateur sera ensuite proposé.

Notre étude prolonge des travaux menés par le passé avec une approche de sources équivalentes extrinsèques paramétrées en puissance RF [1], [2]. Cette approche avait conduit à d'excellents résultats pour la prédiction du bruit de phase d'amplificateurs et d'oscillateurs, mais supposait que le transistor soit utilisé dans le circuit final dans une configuration proche de celle sur laquelle il avait été mesuré en bruit en régime non linéaire. L'approche développée ici est plutôt inspirée de travaux récents [3], [4] sur le bruit en régime non linéaire, et se veut une approche de modélisation intrinsèque des sources de bruit dans le transistor bipolaire.

III. Modélisation de transistors TBH SiGe

Nous avons tout d'abord mesuré les paramètres statiques et linéaires RF d'un transistor TBH SiGe bipolaire de chez Infineon, pour ensuite extraire un modèle non linéaire et le valider. Ce modèle s'appuie sur le modèle de Gummel-Poon implémenté en éléments éclatés rendus compatibles avec le logiciel Agilent ADS.

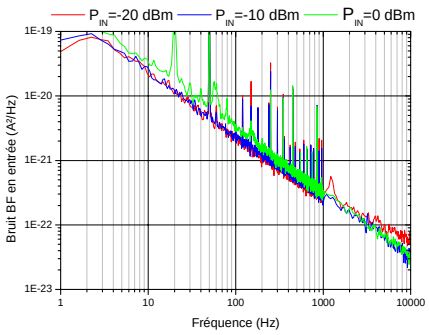

Figure 1 : Mesure du bruit en courant S_{Ib} à l'entrée du transistor en fonction de la puissance RF appliquée

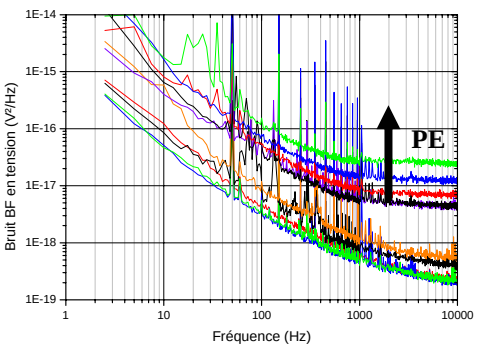

Figure 2 : Mesure du bruit en tension Sv_{be} à l'entrée du transistor en fonction de la puissance RF appliquée

Premièrement, nous nous sommes intéressés à la densité spectrale de bruit en courant S_{Ib} en entrée du transistor laquelle a été mesurée en fonction de la puissance P_{RF} (le transistor étant chargé sur 50 Ω et soumis à un signal RF d'amplitude variable). Comme le montre la Figure 1, le niveau de cette source de bruit en 1/f ne varie pas en fonction de la puissance RF, donc ce n'est pas à ce niveau que la non linéarité intervient.

Cette source correspond à un bruit physiquement bien localisé dans la jonction émetteur base du transistor, et peu sensible aux effets non-linéaires. Il s'agit de la source de bruit prépondérante dans un oscillateur lorsque le transistor est polarisé sur la base en haute impédance. Ces mesures expliquent pourquoi, sous ces conditions, les modèles classiques (SPICE) prédisent relativement bien le bruit de phase.

Il en va tout autrement si on choisit de court-circuiter ce générateur de bruit avec une polarisation basse impédance sur la base (ou avec une capacité de forte valeur). En effet, dans ce cas cette source S_{ib}, devient minoritaire dans la contribution du bruit global du transistor et donc du bruit de phase. Nous avons donc effectué une mesure de la densité spectrale équivalente du bruit en tension en entrée du transistor Sv_{be}.

La Figure 2 montre la sensibilité de cette grandeur au niveau du signal micro-onde en entrée pour une puissance variant du régime linéaire à 6 dB de compression. On remarque cette fois une très forte variation du bruit, d'environ une décade. Cette source de bruit ramenée en entrée étant principalement liée au S_{Ic} du transistor, nous pensons que la principale non linéarité est basée au niveau de cette dernière. Effectivement, ces mesures utilisant une capacité de forte valeur en parallèle avec la base, S_{Ib} n'est plus prépondérante. Seules restent les contributions de la source S_{Ic} et la source de bruit en tension sur l'émetteur ou encore éventuellement une source de contre réaction S_{Ibc}.

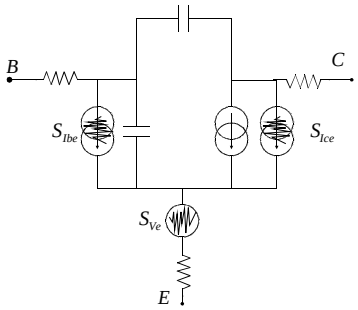

Figure 3 : Modèle utilisé pour l'implémentation des sources de bruit sous Agilent ADS

Nous avons donc procédé à l'intégration de ces sources dans notre modèle non linéaire de notre transistor. Ceci a été effectué grâce aux dispositifs définis symboliquement par des fonctions dans ADS. La grandeur choisie pour décrire la non linéarité de la source S_{Ice}, en parallèle entre collecteur et émetteur, est le courant collecteur instantané Ic au carré.

Nous sommes partis des mesures de bruit BF pour obtenir les valeurs de niveaux des différentes sources utilisées ainsi que leurs non linéarités éventuelles comme pour S_{Ic}. Il ne reste plus qu'à vérifier sur les mesures de bruit de phase si notre modèle est cohérent avec les mesures.

IV. Validation de la modélisation du bruit de phase

Nous avons effectué différentes simulations en rapport avec des mesures déjà disponibles. Ainsi, on peut voir dans les deux figures suivantes que notre modèle rend compte assez fidèlement du niveau de bruit de phase résiduel de notre transistor, et ce dans différentes configurations.

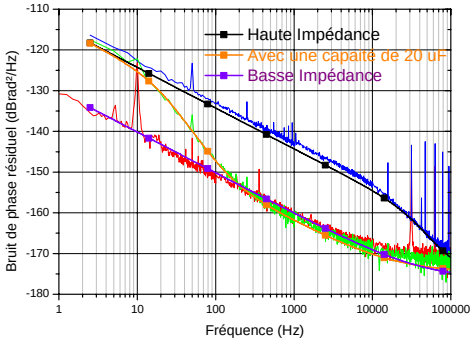

Figure 4 : Bruit de phase mesuré et simulé pour différentes conditions de polarisation du transistor chargé sur 50 Ω en RF, Pe=0 dBm et f=3.5 GHz

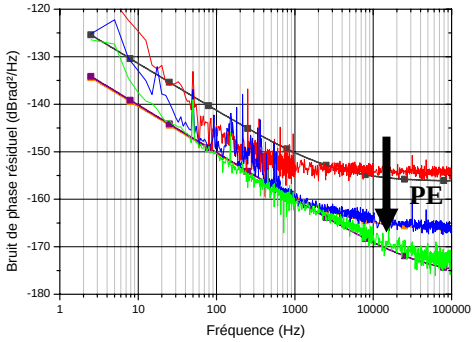

Figure 5 : Bruit de phase mesuré et simulé pour différentes puissances RF à l'entrée du transistor chargé sur 50 Ω, Pe variant de -20 à 0 dBm et f=3.5 GHz

Notre modèle a tout d'abord été validé grâce aux mesures et aux simulations présentées en Figure 4.Cette figure présente les différents niveaux de bruit de phase obtenus pour différentes techniques de polarisation sur la base du transistor. La Figure 5, rend compte de la bonne concordance entre les simulations et les mesures pour notre modèle dans le cas d'un paramétrage sur la puissance RF en entrée du transistor pour une polarisation de la base impédance.

V. Application à la conception d'~amplificateur faible bruit de phase pour oscillateur à très haute pureté spectrale

Pour un oscillateur obtenu en contre-réactionnant un amplificateur sur un résonateur en transmission, le pertes de couplage du résonateur optimisant le bruit de phase sont de 6 dB ($Q_L=Q_0/2$), aussi bien pour le bruit de phase additif [5] que pour le bruit en 1/f converti autour de la porteuse [6], le gain nécessaire pour l'amplificateur sera d'environ 9 dB en tenant compte des pertes additionnelles dans le circuit. Ce niveau de gain est assez facilement atteignable pour des valeurs de fréquences moyennement élevées, mais est néanmoins beaucoup plus difficile à obtenir pour des fréquences plus grandes telles que 10 GHz tout en gardant une adaptation minimisant la conversion du bruit BF en bruit de phase.

Nous avons donc pensé à une topologie utilisant deux étages car les performances d'un tel circuit s'avéraient plus que prometteuses au regard des premières mesures menées grâce à des isolateurs mis entre deux transistors [1]. Les deux transistors utilisés dans notre étude sont deux transistors bipolaires, un à hétérojonction SiGe de chez Infineon et un bipolaire Si de chez Nec.

V.1. Oscillations parasites

Après une première optimisation en gain et en bruit de phase menée grâce à une modélisation rigoureuse en bruit et en compression de nos deux transistors choisis pour cette réalisation, nous avons conçu un premier amplificateur. Néanmoins, plusieurs problèmes de stabilité sont apparus avec une telle configuration. La plus importante source d'instabilité vient de l'adaptation inter étage. En effet, l'adaptation inter-étage est dans notre cas critique ne serait-ce que pour obtenir un gain suffisant car nos deux transistors ne présentent respectivement que 2.5 dB de gain pour l'Infineon et 2 dB pour le Nec à 10 GHz quand ils sont chargés sur 50 Ω.

Le fait d'adapter la sortie du premier transistor sur l'entrée du deuxième est donc une source d'élévation du gain mais aussi d'oscillations éventuelles.

Il devient donc nécessaire de prendre en compte ce paramètre lors de l'optimisation des performances en gain et en bruit du circuit. La polarisation a donc du être dimensionnée de façon à filtrer au maximum les éventuelles oscillations parasites. Ensuite une étude en stabilité a été menée et a conduit à l'ajout de quelques autres composants tels que des capacités ou des inductances de manière à éliminer complètement tout démarrage d'oscillation.

Ainsi, un premier amplificateur bande X ayant 8 dB de gain a été conçu. Il est présenté en Figure 6. Les résultats de mesure et de simulation obtenus avec cet amplificateur sont présentés dans la section suivante.

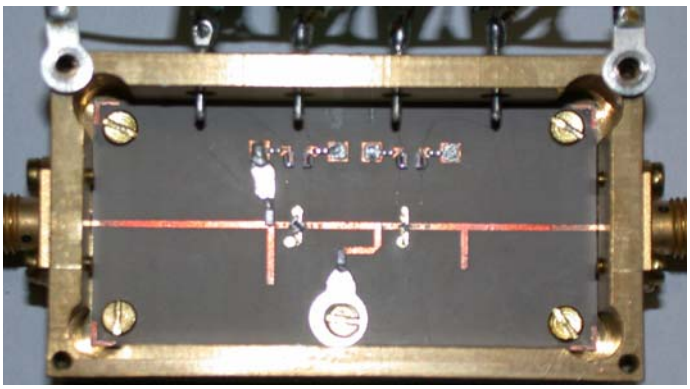

Figure 6 : Photo de l'amplificateur double étage Si-SiGe avec les optimisations de stabilité

V.2. Amplificateur deux étages -- Premiers résultats

La Figure 7 montre les premiers résultats en terme de bruit de phase pour notre amplificateur 8 dB.

Ces résultats ont été obtenus pour une puissance d'entrée RF de 0 dBm avec une fréquence de fonctionnement de 10 GHz. Nous tenons à faire remarquer que cette performance en bruit de phase à une telle fréquence est assez proche d'amplificateurs commerciaux à faible bruit de phase apparus récemment sur le marché (AML communications).

Ces amplificateurs ont plus de gain, mais aussi une consommation plus importante (prohibitive pour les applications embarquées, par exemple). Ils sont probablement basés sur la mise en parallèle de plusieurs transistors (contrairement à notre approche, où les deux composants sont en série).

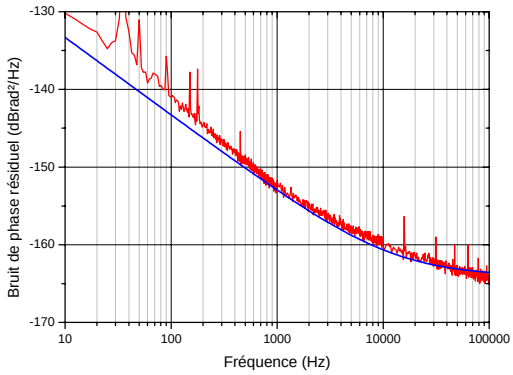

Figure 7 : Bruit de phase mesuré et simulé de l'amplificateur deux étages avec une puissance d'entrée de 0 dBm à une fréquence f=10 GHz

VI. Conclusion

Nous avons démontré dans ce papier qu'il était possible d'implémenter un modèle en bruit de transistor à partir de mesures de bruit BF en régime non linéaire. Nous sommes convaincus en effet que l'approche multi-polarisation peut parfois se révéler insuffisante pour extraire une source de bruit non linéaire, certaines sources de bruit étant quasiment invisibles en régime linéaire, quelle que soit la polarisation.

D'autre part, au regard des résultats de simulations de bruit de phase, on constate que l'approche sources de bruit non-linéaire rend bien compte de l'observation expérimentale. Un couplage avec une modélisation physique du composant serait néanmoins souhaitable pour mieux appréhender le phénomène en cause.

Dans un deuxième temps un amplificateur utilisant une topologie simplifiée a été présenté. Cet amplificateur s'avère être une bonne solution pour obtenir une bonne performance en bruit de phase et présente un gain suffisant pour être utilisé dans le cadre de la conception d'un oscillateur à très haute pureté spectrale à base d'un résonateur saphir.

VII. Références

[1] S. Gribaldo, R. Boudot, G. Cibiel, V. Giordano, O. Llopis, *"Phase noise modelling and optimisation of microwave SiGe amplifiers for sapphire oscillators applications"*, 19th European Frequency and Time Forum (EFTF'2005), Besançon (France), 21-24 Mars 2005, pp.343-347

[2] S. Gribaldo, G. Cibiel, O. Llopis, J. Graffeuil, *"Nonlinear noise in SiGe bipolar devices and its impact on radio-frequency amplifier phase noise",* 18th International Conference on Noise and Fluctuations (ICNF'2005), Salamanque (Espagne), 19-23 Septembre 2005

[3] M. Rudolph, F. Lenk, O. Llopis, W. Heinrich, *"On the simulation of low-frequency noise upconversion in InGaP/GaAs HBTs",* IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol.54, N°7, pp.2954-2961, Juillet 2006

[4] M. Borgarino, C. Florian, P.A Traverso, F. Filicori, *"Microwave large-signal effects on the low-frequency noise characteristics of GaInP/GaAs HBTs ",* IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 53, n°10, pp. 2603-2609, Oct. 2006

[5] J. Everard, "Low noise oscillators", Proc. IEEE Microwave Theory and Tech. Symp., pp. 1177-1080, 1992

[6] G. Cibiel et al., "Optimization of an ultra low phase noise Sapphire SiGe - HBT oscillator using nonlinear CAD", IEEE Transactions on Ultrasoncis, Ferroelectrics.and Frequency control, vol 51, n° 1, Janvier 2004, pp. 33-41