



HAL
open science

Étude d'une électronique refroidie pour un oscillateur hyperfréquence à résonateur supraconducteur

David Chaudy, Olivier Llopis, Bruno Marcilhac, Yves Lemaitre, Olivier d'Allivy Kelly, Jean-Michel Hode

► **To cite this version:**

David Chaudy, Olivier Llopis, Bruno Marcilhac, Yves Lemaitre, Olivier d'Allivy Kelly, et al.. Étude d'une électronique refroidie pour un oscillateur hyperfréquence à résonateur supraconducteur. Journées Nationales Micro-ondes, May 2017, Saint-Malo, France. 4p. hal-01542526

HAL Id: hal-01542526

<https://hal.science/hal-01542526>

Submitted on 19 Jun 2017

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.

Étude d'une électronique refroidie pour un oscillateur hyperfréquence à résonateur supraconducteur

D. Chaudy^{1,2}, O. Llopis², B. Marcilhac³, Y. Lemaitre³, O. d'Allivy Kelly³, J.-M. Hode¹

¹Thales Systèmes Aéroportés, 75-77 Avenue Marcel Dassault, 33700 Mérignac

²LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, 7 Avenue du Colonel Roche, 31031 Toulouse

³Unité Mixte de Physique, CNRS, Thales, Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay, 91767, Palaiseau, France
dchaudy@laas.fr

Résumé – Le choix de composants actifs à faible bruit de phase et leur modélisation est indispensable à la réalisation de sources hyperfréquences à haute pureté spectrale. Différents transistors ont donc été testés vis-à-vis de leurs caractéristiques en gain et en bruit de phase à basse température. Un modèle électrique du composant sélectionné a été extrait et les premières simulations de l'oscillateur cryogénique se révèlent particulièrement prometteuses en termes de pureté spectrale (-155 dBc/Hz à 1 kHz de la porteuse à 1 GHz).

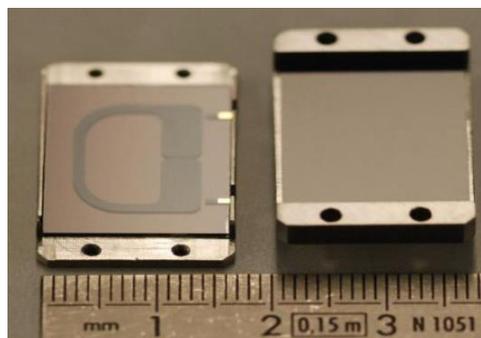


Figure 1. Résonateur cryogénique : film YBaCuO sur un substrat MgO

1. Introduction

La supraconductivité à haute température critique a conduit au développement de résonateurs planaires à très fort facteur de qualité dans la gamme basse des hyperfréquences (quelques GHz). De tels résonateurs, associés à un circuit d'amplification, permettent de réaliser des sources hyperfréquences de grande pureté spectrale (ou faible bruit de phase), présentant des performances meilleures que leurs concurrents basés sur des résonateurs piezoélectriques à ondes de volume (BAW) ou de surface (SAW). En effet, des coefficients de qualité de l'ordre de 150 000 ont pu être démontrés sur ces résonateurs aux environs de 1 GHz [1,2,3]. Toutefois, à ce jour, aucun oscillateur à résonateur supraconducteur n'a pu inclure un système d'amplification lui aussi refroidi.

Le travail présenté se focalise sur la recherche et la modélisation d'un transistor pouvant être utilisé pour réaliser, dans un premier temps un circuit amplificateur, et par la suite un oscillateur complet intégré à 1 GHz, fonctionnant à 60 K et incluant le résonateur supraconducteur (Figure 1). L'objectif est de dépasser d'au moins 10 dB en performance les meilleures sources commerciales à 1 GHz, dont la pureté spectrale se situe aujourd'hui à environ -140 dBc/Hz à 1 kHz de la porteuse.

2. Sélection de composants

Les transistors bipolaires SiGe étant connus pour leurs bonnes performances en bruit en 1/f et ayant déjà été testés lors de différentes études à la température de l'azote liquide [4,5], un ensemble de quatre transistors SiGe a été évalué pour cette application. Les premières mesures ont été menées à 80 K en utilisant l'azote liquide comme fluide réfrigérant, ce qui facilite la procédure expérimentale. Une nouvelle campagne de mesure est prévue à 60 K pour valider le modèle à cette température, qui devrait être la température de fonctionnement de l'oscillateur. La sélection des composants est basée sur deux paramètres : le bruit de phase résiduel du composant à 1 GHz en émetteur commun et à faible compression (1 dB de compression) et le gain du composant sur 50 Ω (S_{21}) à cette même fréquence.

Un banc de mesure de bruit de phase résiduel (Figure 2) optimisé pour le test de composants à 1 GHz, ainsi que des supports spécifiques, ont été réalisés pour mesurer précisément ces transistors. Ce banc est basé sur une source à quartz à haute pureté spectrale à 100 MHz, multipliée par 10 et délivrant à 1 GHz une puissance de 13 dBm. Il met en œuvre la détection à deux mélangeurs par corrélation et, si nécessaire, la réjection du bruit AM de la source [6].

Les performances obtenues à 293 K et à 80 K pour les différents transistors SiGe testés sont présentées dans les Tableaux 1 et 2.

Le transistor choisi parmi ce lot est le TR-2. Comme l'illustre la Figure 3, ce transistor possède de très bonnes performances en bruit de phase résiduel avec peu de dégradations entre les basses températures et la température ambiante.

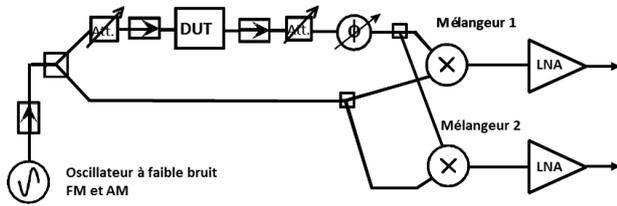


Figure 2. Banc de mesure de bruit de phase en boucle ouverte de composants (transistor = DUT)

Bruit de phase (dBrad ² /Hz) et S ₂₁ à 1 GHz et 293 K	100 Hz	1 kHz	100 kHz	Gain (dB)
TR-1	-149	-157	-166	21,5
TR-2	-156	-164	-169	20,0
TR-3	-136	-157	-164	21,3
TR-4	-163	-170	-175	14,7

Tableau 1. Bruit de phase et gain RF à température ambiante. Le bruit de phase est mesuré à 1 GHz, composant en émetteur commun sur 50 Ω et à P_{1dB}

Bruit de phase (dBrad ² /Hz) et S ₂₁ à 1 GHz et 80 K	100 Hz	1 kHz	100 kHz	Gain (dB)
TR-1	-130	-155	-162	19,0
TR-2	-155	-162	-169	21,4
TR-3	-134	-144	-158	24,4
TR-4	-147	-156	-169	15,6

Tableau 2. Bruit de phase et gain RF à basse température. Le bruit de phase est mesuré à 1 GHz, composant en émetteur commun sur 50 Ω et à P_{1dB}

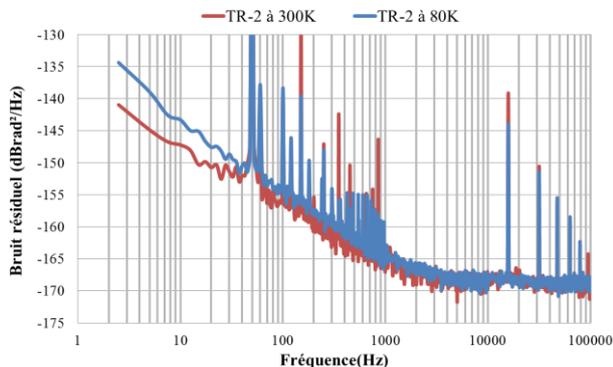


Figure 3. Bruit de phase à 1 GHz mesuré à basse température et à température ambiante du TR-2 à Ic = 30 mA, Vce = 2 V

Afin de pouvoir contrôler l'adaptation du transistor aux basses températures, un ensemble de résistances,

inductances et capacités ont été testées à ces températures afin de vérifier que leurs caractéristiques ne varient pas ou peu jusqu'aux températures d'utilisation.

3. Modèle non-linéaire à basse température

Pour une bonne conception d'oscillateur, la connaissance et la détermination des grandeurs physiques et électriques du composant actif est essentielle. C'est pourquoi un lot de transistors TR-2 a été caractérisé en régime statique, en dynamique, en bruit basse fréquence et en bruit de phase, le tout à 80 K. Ces mesures permettent à l'aide du logiciel ADS de Keysight la détermination des paramètres du modèle de Gummel-Poon utilisé.

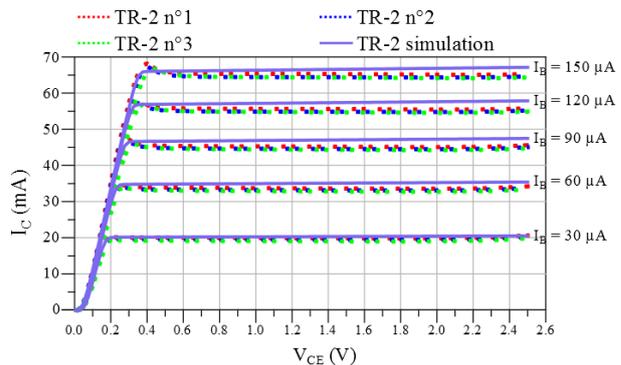


Figure 4. Comparaison mesure-modèle pour les caractéristiques statiques de trois TR-2 à 80 K

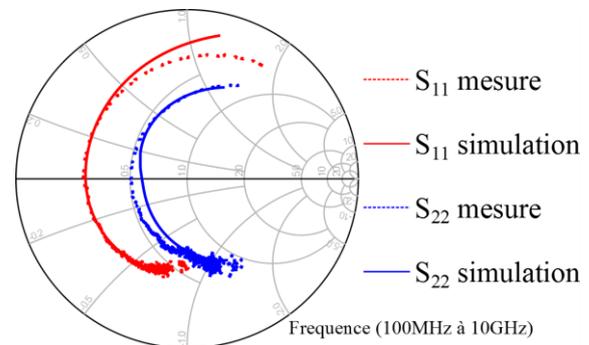


Figure 5. Comparaison mesure-modèle pour les paramètres S₁₁ et S₂₂ du TR-2 refroidis à 80 K

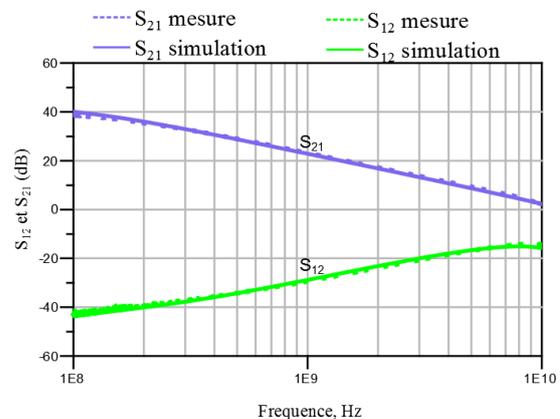


Figure 6. Comparaison mesure-modèle pour les paramètres S₂₁ et S₁₂ du TR-2 refroidis à 80 K

Bien que ce modèle conduise à une bonne adéquation entre mesures et simulation des caractéristiques statiques et dynamiques du transistor (cf. Figures 4 à 7 pour le I(V), les paramètres S et la puissance en sortie en fonction de la puissance injectée.), les caractéristiques en bruit du transistor simulé ne correspondaient pas à la réalité. Une modélisation plus poussée des sources de bruits intrinsèques au composant a donc été nécessaire. Il existe plusieurs méthodes déjà éprouvées qui décrivent et modélisent ces sources pour des transistors SiGe à température ambiante. Celle choisie est décrite dans la référence [7]. Elle consiste en l'ajout de sources de bruits en entrée et sortie du transistor. La Figure 8 montre que cette méthode permet de bien modéliser le bruit du transistor utilisé.

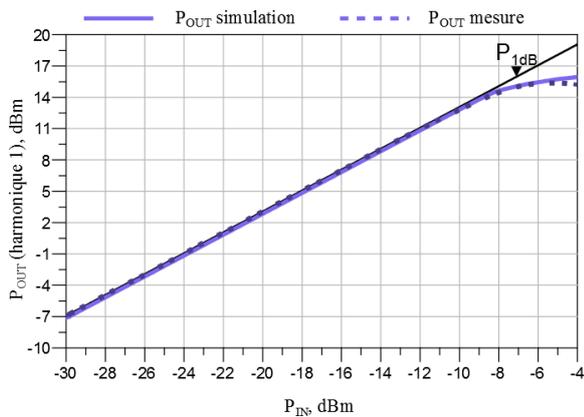


Figure 7. Comparaison mesure-modèle de la caractéristique en puissance du TR-2 refroidi à 80 K

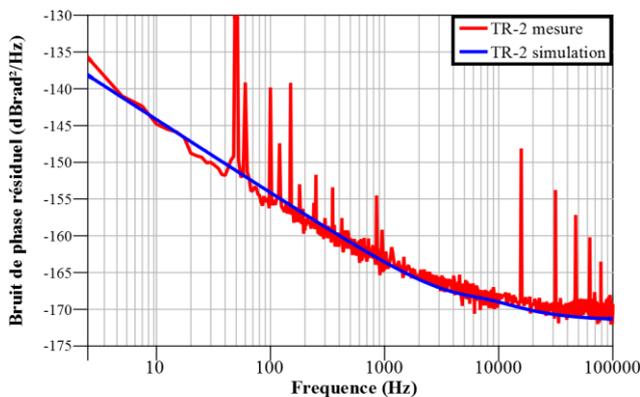


Figure 8. Bruit de phase mesuré et simulé du TR-2 chargé sur 50 Ω, à $I_c = 20$ mA, $V_{ce} = 2$ V et $T = 80$ K

Le résonateur quant à lui est simulé à l'aide de boîtes de paramètres S. Un ensemble de mesures des paramètres S du résonateur a été réalisé pour différents niveaux de puissance en entrée. Ces mesures permettent donc de prendre en compte les effets non-linéaires du résonateur.

4. Simulation de l'oscillateur

Un circuit oscillateur incluant un amplificateur basé sur le composant TR-2 et un résonateur supraconducteur a été simulé à partir du modèle ci-dessus. La topologie

choisie est celle présentée en Figure 9. Elle consiste en une boucle composée de quatre parties élémentaires, l'amplificateur, le coupleur, le déphaseur et le résonateur. Afin de minimiser le bruit du système, il a été décidé d'utiliser le moins de composants passifs possible.

Comme l'illustre la Figure 9, ces contraintes ont amené à l'utilisation de résistances en entrée et sortie de transistor, d'une résistance au niveau de l'émetteur et d'une contre réaction base-collecteur. Ces composants permettant de stabiliser, d'adapter et d'optimiser en bruit de phase résiduel l'amplificateur. Le déphaseur quant à lui est réalisé à l'aide de lignes de transmission afin d'obtenir les conditions d'oscillation.

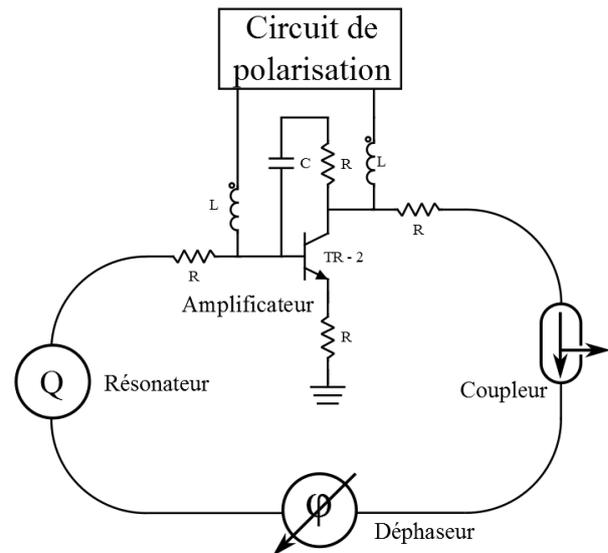


Figure 9. Circuit de l'oscillateur cryogénique

Les premiers résultats nous montrent d'excellentes performances pour cet oscillateur, avec un bruit de phase de -155 dBc/Hz à 1 kHz de la porteuse. L'objectif de dépasser les sources commerciales semble donc atteint au niveau de la simulation. L'étape suivante est donc la réalisation physique d'un prototype sur substrat d'alumine.

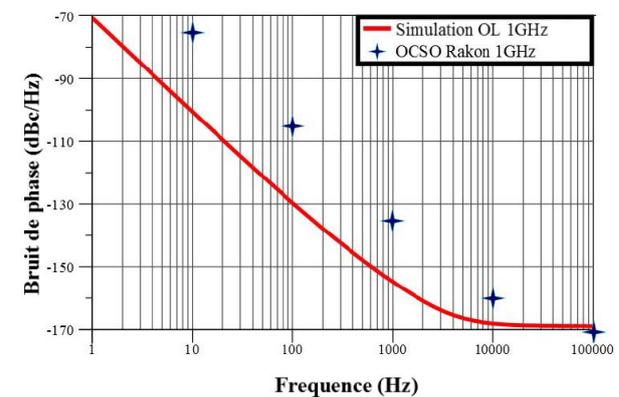


Figure 10. Bruit de phase simulé d'un oscillateur réalisé avec un TR-2 et un résonateur supraconducteur ($Q_0 = 150000$). Comparaison avec une source commerciale Rakon.

5. Conclusion

Des caractérisations et une modélisation de composants hyperfréquences SiGe à 80 K est présentée. Le résultat simulé pour l'oscillateur supraconducteur est particulièrement prometteur. Nous espérons qu'il pourra être confronté à un résultat expérimental en oscillation avant la conférence.

Ce travail est réalisé dans le cadre d'un contrat d'étude de la Direction Générale de l'Armement (DGA).

Références

- [1] J. Kermorvant, « Dissipation par effet Joule en régime hyperfréquence dans les supraconducteurs à haute température critique », Thèse, Ecole Polytechnique, 2010.
- [2] M. Reppel and J. C. Mage, "Superconducting microstrip bandpass filter on LaAlO₃ with high out-of-band rejection," in *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, vol. 10, no. 5, pp. 180-182, May 2000.
- [3] J.-C. Mage, B. Marcilhac, M. Poulain, Y. Lemaitre, J. Kermorvant, J.-M. Lesage, « Low noise oscillator based on 2D superconducting resonator » 2011 EFTF and IEEE-IFCS conference.
- [4] S. Gribaldo, « Modélisation non-linéaire et en bruit de composants micro-ondes pour applications à faible bruit de phase », Thèse, Univ. de Toulouse, 2008.
- [5] S. Weinreb, J. C. Bardin and H. Mani, "Design of Cryogenic SiGe Low-Noise Amplifiers," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 55, no. 11, pp. 2306-2312, Nov. 2007.
- [6] G. Cibiel, M. Regis, E. Tournier, O. Llopis, « AM noise impact on low level phase noise measurements » *IEEE trans. on Ultrasonics Ferroelect. and Freq. Control*, vol. 49, n° 6, Juin 2002, pp. 784-788.
- [7] S. Gribaldo, L. Bary, O. Llopis, « SiGe HBT nonlinear phase noise modeling - X band amplifier design », *Proc. of the EuMA*, 2008, v. 4, pp. 177-182.