



HAL
open science

Fabrication d'Oscillateurs Haute Fréquence (GHz) à base de Résonateurs SAW sur Substrat en Carbone Diamant

Roland Salut, Badreddine Assouar, Omar Elmazria, Fabien Benedic, Celine Gesset, Samuel Saada, Philippe Bergonzo, Franck Omnès, Vincent Edon, Denis Remiens, et al.

► **To cite this version:**

Roland Salut, Badreddine Assouar, Omar Elmazria, Fabien Benedic, Celine Gesset, et al.. Fabrication d'Oscillateurs Haute Fréquence (GHz) à base de Résonateurs SAW sur Substrat en Carbone Diamant. 10ème Congrès Français d'Acoustique, Apr 2010, Lyon, France. hal-00542874

HAL Id: hal-00542874

<https://hal.science/hal-00542874>

Submitted on 3 Dec 2010

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.

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Fabrication d'Oscillateurs Haute Fréquence (GHz) à base de Résonateurs SAW sur Substrat en Carbone Diamant

R. Salut¹, B. Assouar², O. Elmazria², F. Benedic³, C. Gesset⁴, S. Saada⁴, P. Bergonzo⁴, F. Omnes⁵, V. Edon⁶, D. Remiens⁶ et S. Ballandras¹

¹Franche-Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies, 32 Avenue de L'Observatoire, 25044 Besançon Cedex

²Laboratoire de Physique des Milieux Ionisés et Applications, Bvd Des Aiguillettes BP 239, 54506 Vandoeuvre Les Nancy Cedex

³Laboratoire d'Ingénierie des Matériaux et des Hautes Pressions, Institut Galilée, 99, Av J.b Clément, 93430 Villetaneuse

⁴Laboratoire d'Intégration des Systèmes et des Technologies, Bâtiment 451, CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette

⁵Institut Néel, 25 Avenue Des Martyrs, BP 166, 38042 Grenoble Cedex 9

⁶Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie, Avenue Poincaré, Cité Scientifique, BP 69, 59652 Villeneuve d'Ascq Cedex

De nombreux travaux ont été consacrés à évaluer l'intérêt de l'utilisation de substrats en Carbone Diamant pour la fabrication de dispositifs radiofréquences fonctionnant à très haute fréquence (GHz), et basés sur la technologie SAW (Surface Acoustique Waves). L'intérêt principal de ce matériau réside dans sa très grande vitesse de phase (de l'ordre de 10 km.s^{-1}). Nous présenterons le travail issu de la collaboration entre différents groupes de recherche dont le but est d'identifier précisément les capacités de tels substrats pour la fabrication d'oscillateurs RF stabilisés, dans la gamme 5GHz - 10GHz. Le choix de la meilleure configuration a déjà été étudié lors de travaux précédents [1]. Elle se compose d'un multicouche : substrat / Carbone diamant ($5\mu\text{m}$) / couche piézoélectrique (ZnO). Les dispositifs SAW proprement dit sont fabriqués par lithographie électronique. Nous montrerons nos derniers travaux concernant l'optimisation des caractéristiques de la couche piézoélectrique qui nous ont permis d'atteindre des produits QF (facteurs de qualité x fréquence) supérieurs à 10^{12} pour des résonateurs doubles ports. Les oscillateurs à contre-réaction ainsi fabriqués seront caractérisés (bruit de phase) et les résultats seront comparés avec la théorie.

1 Introduction

De nombreux travaux ont été consacrés à évaluer l'intérêt de l'utilisation de substrats en carbone diamant pour la fabrication de dispositifs radiofréquences fonctionnant à très haute fréquence (GHz), et basés sur la technologie SAW [2].

L'intérêt majeur de ce matériau réside dans sa très grande vitesse de phase des ondes élastiques de surface qui s'y propagent, typiquement comprise entre 7 et 12 km.s^{-1} lorsqu'il est utilisé en tant que guide d'onde. Par contre, l'absence de propriétés piézoélectriques de ce matériau requiert l'utilisation d'un film piézoélectrique pour exciter et détecter les ondes. La qualité du composant final est donc fonction à la fois de celle de la couche piézoélectrique et de celle du diamant. Jusqu'à maintenant, seules quelques études ont été menées pour déterminer les limites de tels composants, et les résultats font état de coefficients de qualité de la résonance plutôt modestes (produit QF inférieurs à 2.10^{12}).

Dans ce travail, différents groupes de recherche collaborent pour identifier les capacités de substrats à base de carbone diamant afin de développer des résonateurs à des fréquences de l'ordre de 5 GHz, afin de stabiliser des oscillateurs RF dans cette gamme de fréquence. Différentes combinaisons de matériaux ont été testées afin d'identifier la meilleure, permettant d'atteindre l'objectif visé [1]. Le

carbone diamant [3] nanocristallin a été particulièrement étudié dans ce but, couplé à différentes couches piézoélectriques (Nitrure d'Aluminium - AlN, Niobate de Lithium - LiNbO₃, Oxyde de Zinc - ZnO) déposées par pulvérisation cathodique. Dans un premier temps, nous présentons l'étude concernant le choix du design permettant d'atteindre des fréquences de l'ordre de 5GHz. Les caractéristiques des dépôts sont rapidement décrites, et nous insistons particulièrement sur l'utilisation de la face de nucléation. Ce paramètre permet d'atteindre une faible rugosité de surface, facteur déterminant lors de l'étape de lithographie électronique permettant de définir les électrodes métalliques. Les résultats obtenus nous permettent d'identifier le meilleur empilement, à savoir une couche piézoélectrique en Oxyde de Zinc sur une couche de Carbone Diamant nanocristallin. Cet empilement est ensuite utilisé pour réaliser un oscillateur à 3GHz dont les caractéristiques principales de stabilité, soit la variance d'Allan et le bruit de phase, seront mesurés et analysés.

2 Conception des dispositifs

2.1 Analyse des courbes de dispersion

Nous avons choisi une structure simple, permettant de réaliser des premiers véhicules de tests en minimisant les difficultés technologiques de mise en œuvre. Des structures plus complexes, requérant différentes étapes de

gravure/dépôt pourront être étudiées dans de futurs travaux. La figure 1 montre le choix de l'empilement et définit l'orientation des axes.

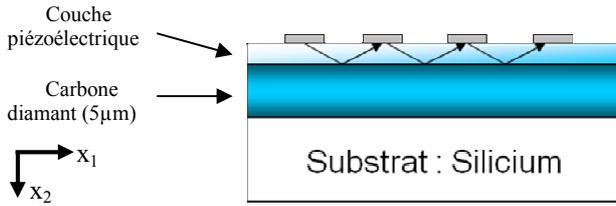


Figure 1 : Configuration typique utilisée lors des simulations. L'épaisseur de la couche de Carbone Diamant est fixée à 5µm.

Trois couches différentes ont été étudiées pour exciter les ondes, l'AlN, le ZnO, et le LiNbO₃. La couche de Carbone Diamant est fixée à 5µm pour éviter toute radiation dans le substrat. Le substrat est considéré semi-infini, et on fait varier l'épaisseur de la couche piézoélectrique afin de trouver le meilleur point de fonctionnement. Pour cela, les principaux paramètres des ondes sont calculés à partir de la permittivité effective de surface de l'empilement (voir l'exemple de la figure 2).

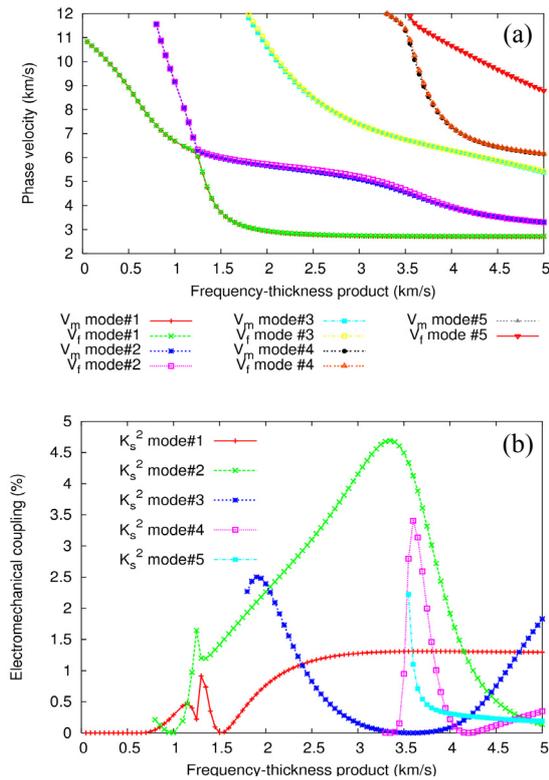


Figure 2 : Courbes de dispersion pour la configuration ZnO/C-D/Si, (a) vitesse de phase, (b) couplage électromécanique

Pour chaque configuration, le meilleur point de fonctionnement a été sélectionné, en prenant en compte les critères suivants : le plus grand couplage électromécanique possible, la pureté du mode, et la plus petite dispersion de vitesse. Les résultats pour les trois couches considérées sont

reportés dans la table 1, en vue d'un fonctionnement à 5 GHz.

| Piezo layer | Mode number | Frequency.thickness $f.t$ (km.s ⁻¹) | Targeted thickness @ 5GHz (µm) |
|--------------------|-------------|---|--------------------------------|
| LiNbO ₃ | 3 | 1 – 1.5 | 0.27 |
| AlN | 2 | 2.5 – 3 | 0.55 |
| ZnO | 3 | 1.75 – 2.25 | 0.45 |

Table 1 : points de fonctionnement sélectionnés

2.2 Propagation sous un réseau périodique et simulation grâce à la méthode des matrices mixtes

Nous utilisons dans un premier temps notre propre modèle de couplage d'éléments finis / éléments de frontières [4] pour simuler la propagation des ondes sous un réseau périodique d'électrodes en aluminium, afin d'optimiser la structure des résonateurs. Nous avons particulièrement étudié l'évolution de la vitesse de phase, du facteur de couplage électromécanique, et du coefficient de réflexion en fonction de la forme de l'électrode. Les paramètres optimisés (épaisseur relative - h/λ , et rapport de métallisation - a/p) ont été déduits des courbes de dispersion et reportés dans la table 2, avec les caractéristiques attendues pour la propagation des ondes. Exploitant alors ces dernières caractéristiques, des dispositifs simple et double ports ont été considérés pour les calculs par matrice mixte. Des structures synchrones et Hiccup ont été simulées. Les résultats obtenus à partir des données de la table 2 sont assez optimistes car ils ne tiennent pas compte des pertes introduites par les couches de Carbone Diamant et de matériau Piézoélectrique. Le nombre de paires de doigts dans le transducteur a été fixé à 100 pour favoriser une bonne dynamique. Les miroirs sont quant à eux composés de 200 électrodes afin de permettre une bonne réflexion des ondes. L'ouverture acoustique a été fixée suffisamment large de sorte à éviter toute diffraction. Ce type de structures est de plus compatible avec un procédé de lithographie électronique (temps d'insolation inférieur à 1h).

| Piezo layer | period (µm) | Electrode h/λ (%) | a/p | Velocity (m.s ⁻¹) | K_s^2 (%) | Reflection (%) |
|--------------------|-------------|---------------------------|-------|-------------------------------|-------------|----------------|
| LiNbO ₃ | 0.96 | 3.8 | 0.50 | 9850 | 7.6 | 7.0 |
| AlN | 1.01 | 5.0 | 0.50 | 10471 | 1.0 | -3.9 |
| ZnO | 1.04 | 5.0 | 0.65 | 10191 | 0.87 | -12.3 |

Table 2 : Paramètres de la matrice mixte en fonction des configurations matériau

3 Fabrication du résonateur

Tout d'abord, nous décrivons brièvement la méthode de croissance du Carbone Diamant. Bien que l'étude de conception des dispositifs est été menée pour différentes couches piézoélectriques, seule la couche de ZnO présentée plus bas nous a permis d'obtenir des résultats satisfaisants. Enfin, nous décrivons le synoptique de fabrication par

lithographie électronique, parfaitement adaptée à nos échantillons de petite taille (env. 1 cm²).

3.1 Croissance du diamant sur silicium

Les couches de Carbone Diamant Nanocristallin ont été réalisées par Nanoseeding MPCVD (Microwave Plasma assisted Chemical Vapor Deposition), à l'aide d'un mélange de trois gaz : Ar, H₂, CH₄. La technique de Nanoseeding consiste à disperser à la surface de l'échantillon des nanoparticules de diamant qui vont servir de germe à la croissance du film diamant. Les meilleurs résultats ont été obtenus à fortes puissances plasma (entre 600 et 1100W) et hautes températures (800 à 1000°C). La figure 3 présente le schéma du réacteur permettant la croissance du Carbone Diamant et une vue AFM de la surface de nucléation, permettant d'obtenir une rugosité faible (2nm) compatible avec l'étape de lithographie électronique. L'utilisation de la face de nucléation requiert un temps de dépôt long (de l'ordre de 24h) afin d'obtenir un film suffisamment épais (300µm), qui sera libéré de son substrat en Si par gravure humide (HF/HNO₃).

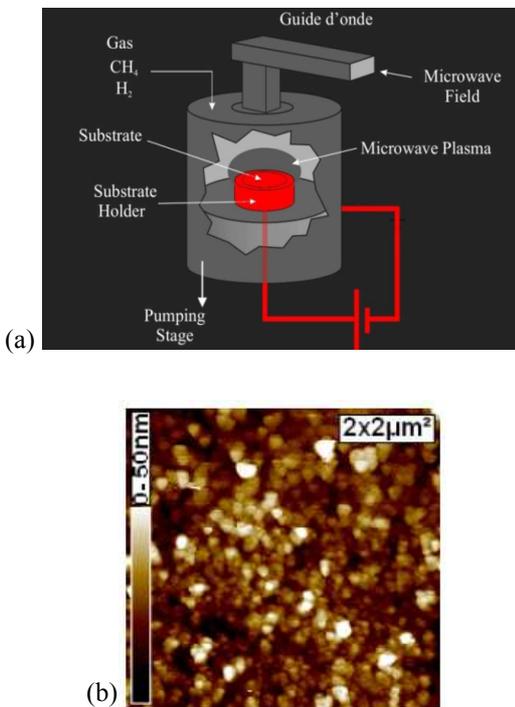


Figure 3 : (a) principe de la croissance MPCVD, et (b) image AFM de la face de nucléation (rugosité RMS = 2nm)

3.2 Dépôt de la couche piézoélectrique de ZnO

La couche de ZnO a été réalisée par pulvérisation magnétron. Les couches déposées ont en général une faible rugosité (de l'ordre de quelques nm), mais le résultat final dépend fortement de la rugosité initiale du Carbone Diamant. Les mesures expérimentales ont montrées que seule cette couche, qui présente par ailleurs une orientation cristalline bien maîtrisée et stable (voir figure 4), permet d'atteindre les spécifications visées.

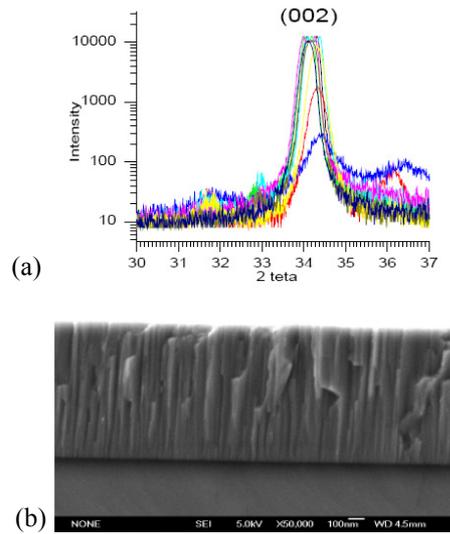


Figure 4 : (a) Spectre rayons X (rocking curve) d'une couche de ZnO, et (b) image MEB de la même couche

3.3 Lithographie électronique

La figure 5 décrit l'enchaînement des étapes permettant de réaliser les électrodes à la surface de l'échantillon. La lithographie électronique est réalisée à l'aide d'une station Raith E_Line. La dose est optimisée en fonction de la nature du substrat. 20 à 30 résonateurs sont fabriqués sur chaque échantillon testé, ce qui donne statistiquement une bonne appréciation quantitative du fonctionnement des dispositifs. La figure 6 montre deux images MEB des dispositifs ainsi fabriqués.

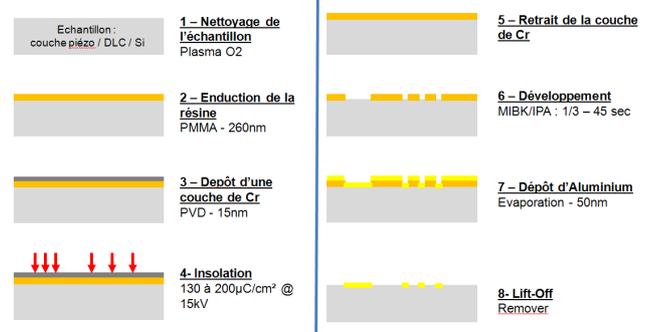


Figure 4 : Synoptique de fabrication des électrodes en aluminium

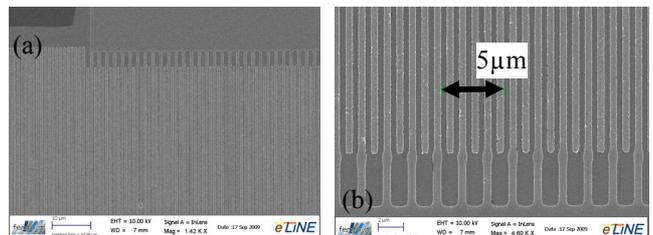


Figure 5 : (a) et (b) sont des images MEB des résonateurs fabriqués par lithographie électronique

4 Réalisation d'un oscillateur stabilisé à 3 GHz

4.1 Caractérisation du résonateur double port

La rotation de phase étant notablement faible pour les résonateurs simple port, nous nous sommes portés vers la réalisation de résonateurs doubles ports. La figure 6 présente la fonction de transfert obtenue, avec une résonance centrée en 3GHz, et un facteur de qualité $Q = 780$. Le pic de résonance se trouve décalé de 5 à 3 GHz car nous avons du mal à maîtriser l'épaisseur de la couche piézoélectrique de ZnO déposée. La figure 7 présente les différents points de fonctionnement simulés avec une épaisseur de ZnO de 400 et 500nm : on retrouve bien le mode 3 à 5 GHz ($e_{\text{ZnO}} = 400\text{nm}$) et le mode 2 à 3GHz ($e_{\text{ZnO}} = 500\text{nm}$) qui se révèle seul assez résolu et couplé pour permettre la stabilisation d'une boucle d'oscillation. Dans ce cas, les peignes inter-digités sont composés de 100 paires de doigt, et les miroirs de 200 électrodes. La période est fixée à $1\mu\text{m}$ pour une largeur d'électrode de 600nm . La cavité mesure $20,5\mu\text{m}$, ce qui permet théoriquement d'obtenir une résonance située au centre de la bande d'arrêt.

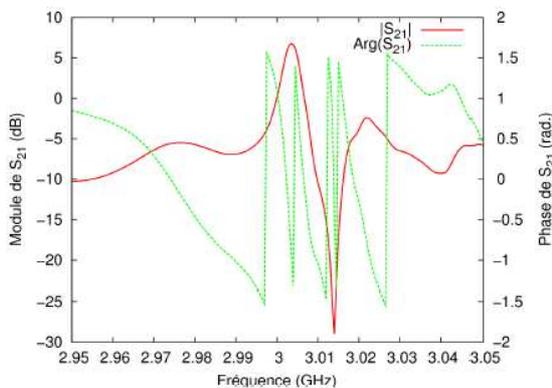


Figure 6 : Fonction de transfert d'un résonateur double port centré en 3,0035 GHz ($Q = 780$)

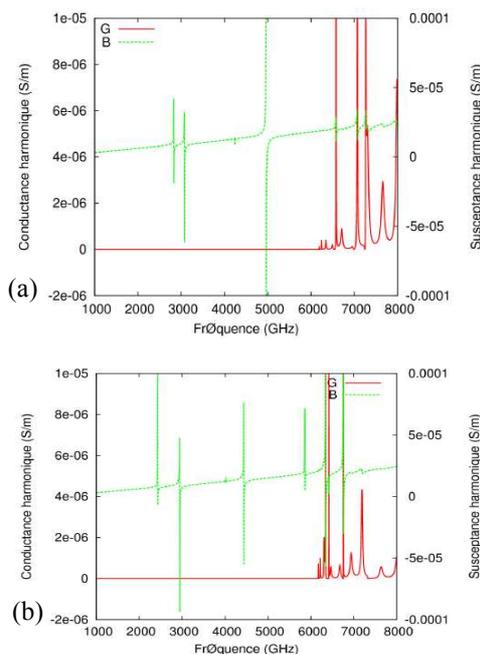


Figure 7 : Simulation des réponses des résonateurs pour (a) le point de fonctionnement visé ($e_{\text{ZnO}} = 400\text{nm}$) et (b) le point de fonctionnement atteint ($e_{\text{ZnO}} = 500\text{nm}$)

4.2 Oscillateur à 3GHz

Afin de faire la démonstration du fonctionnement de cet oscillateur, nous avons opté pour une mise en œuvre utilisant le testeur sous pointe pour réaliser la connexion avec le résonateur. L'oscillateur résultant consiste en un quadripôle présentant le moins de pertes possible (28 dB) avec une chaîne d'amplification en contre réaction, un coupleur permettant la mesure du signal ainsi engendré et un nouvel étage d'amplification en suite du coupleur pour isoler la boucle d'oscillation du synthétiseur utilisé lui pour l'asservissement nécessaire à la mesure du bruit de phase et de stabilité moyen terme. L'étage d'amplification composé de 3 amplificateurs (deux Hittite HMC478MP86 et un Mini-Circuits ZX60-8008E-S+) présente un gain cumulé de 40dB. La figure 8 illustre le principe de la boucle d'oscillation. Les conditions d'oscillation ont été ajustées en introduisant des éléments de déphasage (connecteur SMA) dans la boucle.

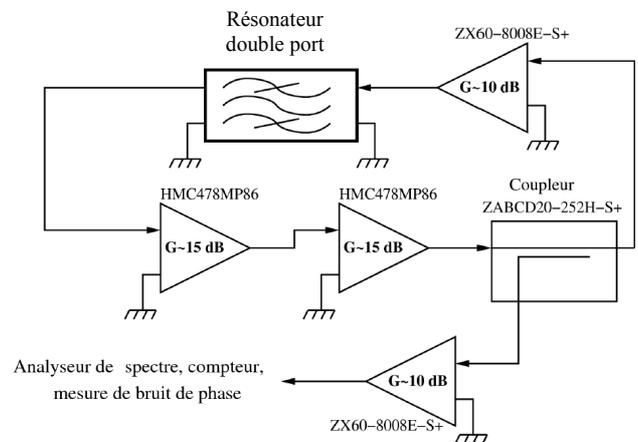
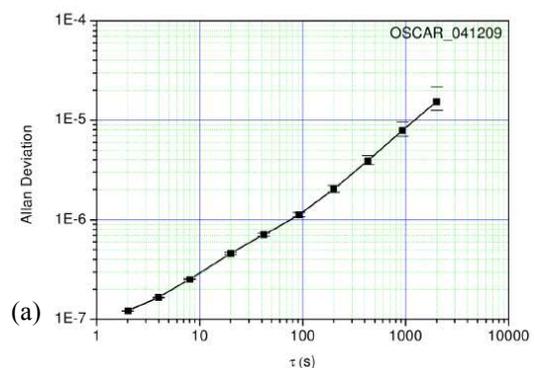


Figure 8 : Schéma de principe de la boucle d'oscillation

Nous avons alors pu mesurer la stabilité moyen terme du résonateur sur une durée d'1 heure. La figure 9 montre le résultat correspondant sous forme de variance d'Allan, donnant une valeur de stabilité relative sur une seconde de 10^{-7} . Cette valeur certes modeste est à considérer à l'aune des difficultés liées à l'expérience (5m de longueur de câbles, pas de contrôle de température, vibrations). La mesure de bruit de phase (figure 9) donne une valeur de 100 dBc à 10 kHz de la porteuse



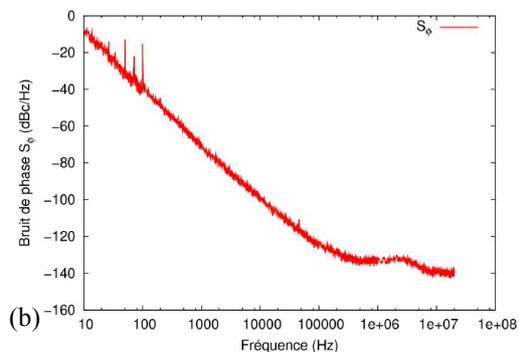


Figure 9 : Caractérisation de l'oscillateur : (a) variance d'Allan, et (b) mesure de bruit de phase

Ces résultats ne permettent pas encore de se comparer à l'état de l'art mais ils démontrent le potentiel de cette approche. En effet, avec une encapsulation adaptée, un oscillateur compact et une connectique adaptée aux exigences RF, on est en droit d'espérer un gain significatif en stabilité moyen terme (un ordre de grandeur au moins). Atteindre 10^{-9} en stabilité moyen terme semble donc parfaitement réaliste sans besoin de stabilisation thermique particulière. Pour le bruit de phase, les -110 dBc/Hz obtenus peuvent également être notablement améliorés par un blindage standard du système conditionné et une minimisation des sources de bruit liées aux éléments de la boucle d'oscillation. On espère là encore améliorer les résultats dans le futur et passer sous les 120 dBc/Hz. Restera encore le délicat problème de la stabilité thermique à résoudre (de l'ordre de -40 ppm/K pour le mode exploité ici). Ce point doit faire l'objet d'efforts supplémentaires tant au niveau de la structure du composant qu'en termes de propriété de base des matériaux utilisés.

5 Conclusion

Ce travail nous a permis de tester différentes combinaisons de matériaux, aussi bien du point de vue simulation que fabrication. Les couches de carbone diamant ont été optimisées de sorte à obtenir un état de surface convenable pour la réalisation de la lithographie électronique. Des résonateurs double ports ont été fabriqués et ont permis de mettre au point un oscillateur à 3 GHz dont les caractéristiques ont été mesurées.

Remerciements

Ce travail a été soutenu en grande partie par la Délégation Générale de l'Armement, sous le contrat #6369740680238016.

Références

- [1] R. Salut, C. Gesset, S. Saada, V. Yantchev, B. Assouar, F. Bénédic, P. Bergonzo, F. Omnes, V. Edon, D. Rémiens, O. Elmazria, I. Kartadjiev, S. Ballandras, « Fabrication of GHz range oscillators stabilized by nano-carbon-diamond-based surface acoustic resonators », *Proc. of the IEEE IUS*, Rome, (2009)
- [2] T. Uemura, S. Fujii, K. Itakura, H. Kitabayshi, A. Hachigo, H. Nakahata, S. Shikata, K. Ishibashi, T. Imai, *Sei Technical Review N°54*, (2002)

- [3] D. Monéger, F. Bénédic, R. Azouani, F. Chelibrane, O. Syll, F. Silva, A. Gicquel, *Diamond and Related Materials*, Vol. 16, Iss.4-7 (2007)
- [4] S. Ballandras, A. Reinhardt, V. Laude, A. Soufyane, S. Camou, W. Daniau, T. Pastureaud, W. Steichen, R. Lardat, M. Solal, P. Ventura, *J. Appl. Phys.*, Vol. 96, n°12, pp. 7731-7741 (2004)