

RÉFÉRENCES DE FRÉQUENCE ULTRA-STABLES

P.Y. Bourgeois, Y. Gruson, N. Boubekeur, R. Boudot, N. Bazin, Y. Kersalé, E. Rubiola et V. Giordano

Laboratoire de Physique et de Métrologie des Oscillateurs, CNRS UPR 3203

associé à l'Université de Franche-Comté, 32 av. de l'Observatoire,

25044 Besançon Cedex, France.

On assiste actuellement à une croissance importante du nombre d'applications scientifiques et techniques réclamant des oscillateurs de grande stabilité de fréquence. Par exemple la métrologie, les futurs programmes spatiaux ou encore certains tests de physique fondamentale nécessitent des oscillateurs de référence présentant une instabilité de fréquence de l'ordre de 1×10^{-14} sur des temps d'intégration typiquement compris entre 1s et 10.000s [1, 2, 3]. D'autre part l'amélioration de la sensibilité des instruments de mesure de bruit de phase ou des systèmes radar passe par une diminution significative du bruit de phase des oscillateurs de référence.

Le Laboratoire de Physique et Métrologie des Oscillateurs (LPMO UPR 3203 CNRS) participant à la chaîne métrologique française est accrédité suivant la norme ISO/CEI 17025 pour réaliser des calibrages et des mesures de stabilité de fréquence à court terme sur des oscillateurs et synthétiseurs de fréquence[4]. En parallèle avec cette activité de service offerte à l'industrie et aux laboratoires de recherche, nous développons de nouvelles méthodes et des nouveaux outils pour améliorer la sensibilité des mesures et la stabilité des sources de références [5, 6].

Nous présentons dans cet article plusieurs réalisations d'oscillateurs ultra-stables basés sur des résonateurs saphir à mode de galerie. Le saphir (monocristal d' Al_2O_3) est le matériau diélectrique présentant les plus faibles pertes dans la gamme des fréquences micro-ondes. L'utilisation de modes de résonance particuliers appelés *modes de galerie* permet de concentrer la quasi totalité de l'énergie électromagnétique dans un cylindre de saphir. Le coefficient de surtension du résonateur est alors limité essentiellement par la tangente de perte du saphir. En bande-X, il peut atteindre 200.000 à température ambiante, 30 millions à 77K et plus de 5×10^8 à la température de l'hélium liquide. Ce résonateur constitue alors une excellente référence de fréquence qui peut être intégrée dans un circuit oscillant. Plusieurs dispositifs ont été étudiés :

Oscillateur à très faible bruit de phase :

La forte valeur du coefficient de surtension du résonateur permet d'atteindre des niveaux de bruit de phase inférieurs de -20dB aux performances des oscillateurs micro-ondes classiques. Des améliorations importantes sont encore obtenues en utilisant des circuits d'amplification à très faible bruit ou des systèmes de correction en temps réel .

Oscillateur de très haute stabilité à résonateur saphir cryogénique à 6K.

La présence d'impuretés paramagnétiques en très faible quantité dans le monocristal de saphir fait apparaître une température d'inversion aux environs de 6K pour laquelle la sensibilité thermique du résonateur s'annule. Il est alors possible de construire un oscillateur présentant des performances de stabilité exceptionnelles. C'est ainsi que nous avons obtenu très récemment une stabilité de fréquence de l'ordre de $4-5 \times 10^{-14}$ sur la journée : ce qui constitue un record mondial.

Oscillateurs à résonateur compensé fonctionnant à $T \geq 40K$:

Si l'hélium liquide permet l'obtention de stabilités de fréquence exceptionnelles, il reste pour l'instant difficile à utiliser à l'extérieur d'un laboratoire de métrologie. Un certain nombre de structures présentant des températures d'inversion supérieures à 40K ont été testées. Bien que leurs perfor-

mances soient moindres, ces structures constituent des solutions alternatives susceptibles d'être à terme intégrées dans des systèmes plus autonomes.

Dans cet article, après avoir rappeler les besoins en stabilité pour les applications les plus typiques, nous présenterons les détails et les performances des différents systèmes réalisés au LPMO.

Références

- [1] A. Mann and G. Santarelli and S. Chang and A. N. Luiten and P. Laurent and C. Salomon and D. G. Blair and A. Clairon, "A high stability atomic fountain clock using a cryogenic sapphire interrogation oscillator," in *Proc. IEEE International Frequency Control Symposium*, (Pasadena, CA.), pp. 13–17, May 27–29, 1998.
- [2] P. Wolf, S. Bize, A. Clairon, A. N. Luiten, G. Santarelli, and M. E. Tobar, "Test of lorentz invariance using a microwave resonator," *Physical Review Letters*, vol. 90, pp. 060402–1–4, Feb. 14,.
- [3] V. Candelier, P. Canzian, J. Lamboley, M. Brunet, and G. Santarelli, "Space qualified 5MHz ultra-stable oscillators," in *Proc. IEEE International Frequency Control Symposium*, (Tampa, Fl., USA), pp. 575–582, 4–8 2003.
- [4] D. Hauden, J. Gros Lambert, G. Martin, V. Giordano, and O. D. Monaco, "Recherche et service de certification en métrologie des fréquences au LPMO-CNRS," in *Actes du 8ème Congrès International de Métrologie*, (Besançon, France), pp. 303–306, Oct. 20–23, 1997.
- [5] E. Rubiola and V. Giordano, "A low-flicker scheme for the real-time measurement of phase noise," *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 49, no. 74, pp. 501–507, 2002.
- [6] V. Giordano, Y. Kersalé, O. D. Monaco, and M. Chaubet., "Progress report on the development of microwave spectral references at the LPMO," *European Physical Journal - Applied Physics*, vol. 8, pp. 269–274, Dec. 1999.

Corresponding author :

Vincent Giordano

LPMO-CNRS

32 av. de l'Observatoire

25044 Besançon Cedex France

tel : +33 (0) 381 853 973

fax : +33 (0) 381 853 998

email : giordano@lpmo.edu