

OBAMA : Oscillateurs MEMS HBAR pour Micro-Horloge Atomique**OBAMA: HBAR MEMS Oscillator for Miniature CPT-based Atomic Clock**

Porteur(s) : R. Boudot (FEMTO-ST)

Partenaire(s) : F. Gegot (SENSEOR)

Résumé du projet en Français :

Le projet vise au développement d'un démonstrateur d'oscillateur microonde commandable en tension (VCO) à 4.596 GHz à résonateur MEMS HBAR (High-Overtone Bulk Acoustic Wave Resonator) dédié au rôle d'oscillateur local dans une horloge atomique à microcellule de césium basée sur la technique d'interrogation CPT. Ces oscillateurs miniatures à très haute pureté spectrale sont une potentielle alternative très intéressante pour supplanter les architectures conventionnelles actuelles d'oscillateur local en micro-horloge exploitant un VCO à 4.6 GHz asservi en phase sur un oscillateur quartz 10 MHz type TCXO par un système de boucle à verrouillage de phase fractionnaire. Aujourd'hui près de 50% de la consommation d'une micro-horloge atomique (60 mW sur 125 mW) est consacrée au module oscillateur local. Le recours aux oscillateurs MEMS microondes est une opportunité de réduire de manière importante le budget en consommation des micro-horloges atomiques, tout en assurant des performances en bruit de phase absolu améliorées de ces dernières, les rendant exploitables dans des systèmes où la pureté spectrale loin de la porteuse est d'intérêt (type applications radar).

Abstract in English:

The project aims to develop a 4.596 GHz MEMS HBAR-based microwave voltage controlled oscillator devoted to be used as a local oscillator in a Cs vapor microcell-based CPT atomic clock.

These miniature high-spectral purity oscillators are interesting candidates to replace conventional local oscillator architectures using a 4.6 GHz VCO phase-locked to a 10 MHz quartz oscillator (TCXO) through a fractional N-PLL system. Today, about a half of the total power consumption of miniature atomic clocks is dedicated to the local oscillator module. The development of MEMS HBAR oscillators stands as an exciting opportunity to reduce drastically the power consumption of miniature atomic clocks, with additional improvement of absolute phase noise performances.

These aspects could help miniature CPT-based atomic clocks to be of great interest in mobile and embedded systems where spectral purity of the local clock is crucial, such as radar defense systems.

Résultats marquants :

- Caractérisation détaillée de résonateurs HBAR à 2.3 GHz, avec $Q = 25000$, pertes = 15-20 dB et résonances séparées d'environ 10 MHz.

Mesure de la sensibilité en température de la fréquence du résonateur = -25 ppm/K.

Première observation d'effets non linéaires dans des résonateurs HBAR, avec une sensibilité de la fréquence de résonance à la puissance microonde d'entrée de l'ordre de $-5 \cdot 10^{-10} / \mu\text{W}$.

Mesure de bruit de phase résiduel de résonateurs HBAR : -110 à -130 dB rad^2/Hz at 1Hz d'offset, soit une déviation d'Allan ultime d'un oscillateur associé à $7 \cdot 10^{-12}$ à 1 s.

Développement et caractérisation d'un oscillateur à résonateur HBAR ((60, -120, and -145 dB rad^2/Hz à 10Hz, 1 kHz, 10 d'offset pour une porteuse à 2.3 GHz). Les performances de cet oscillateur à $f=10$ kHz sont meilleures que celle d'un oscillateur à quartz 100 MHz à l'état de l'art multiplié en fréquence. Les performances de cet oscillateur à $f=1$ kHz sont 50 dB meilleures que celles d'un oscillateur local (quartz + PLL fractionnaire) typiquement utilisé dans une microhorloge.

Démonstration de l'asservissement d'un oscillateur HBAR sur une résonance CPT à l'aide d'une synthèse de fréquence simple (doublage de fréquence) sans DDS. La stabilité relative de fréquence de l'oscillateur, de 1.8×10^{-9} à 1 s en regime libre passé à $6.6 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ en régime asservi.

Highlights:

Detailed characterization of 2.3 GHz AlN-Sapphire high-overtone bulk acoustic resonators (HBARs), with a typical loaded Q-factor of 25000, 15–20 dB insertion loss, and resonances separated by about 10 MHz.

Measurement of the temperature coefficient of frequency of HBARs to be about -25 ppm/K.

First observation in HBARs at high-input microwave power of a significant distortion of the HBAR resonance lineshape, attributed to non-linear effects. The power-induced fractional frequency variation of the HBAR resonance was measured to be about $-5 \cdot 10^{-10} / \mu\text{W}$.

Residual phase noise measurements of HBARs in the range of -110 to -130 dBrad²/Hz at 1Hz Fourier frequency, yielding resonator fractional frequency fluctuations at the level of -205 to -225 dB/Hz at 1Hz and an ultimate HBAR-limited oscillator Allan deviation about $7 \cdot 10^{-12}$ at 1s integration time.

Development and characterization of a ultra-low phase noise HBAR oscillator (60, -120, and -145 dBrad²/Hz for offset frequencies of 10 Hz, 1 kHz, 10 kHz respectively was measured at 2.3 GHz). Performances at 10 kHz offset are better than any state-of-the-art frequency multiplied 100 MHz oscillator. Performances of the HBAR oscillator at 1 kHz offset are 50 dB better than those of a conventional LO for CSACs.

Successful stabilization of the HBAR oscillator frequency, through a simple frequency synthesis without DDS, onto a microcell-based CPT atomic resonance. The short-term fractional frequency stability of the HBAR oscillator was improved from 1.8×10^{-9} at 1 s in the free-running regime to $6.6 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ in the locked regime. The short-term stability of the atomic clock was not limited by the HBAR LO phase noise.

In conclusion, HBAR oscillators could be attractive candidates to be used as Los in CSACs.

Publications and communications linked with the funded project:

Peer-reviewed articles:

1/ T. Daugey, J. M. Friedt, G. Martin and R. Boudot, A HBAR-oscillator-based 4.596 GHz frequency source : Application to a coherent population trapping Cs vapor cell atomic clock, Review of Scientific Instruments 86, n ° 114703 (2015). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4935172>

2/ R. Boudot, G. Martin, J. M. Friedt and E. Rubiola, Frequency flicker of 2.3 GHz GHz AlN-Sapphire high-overtone bulk acoustic resonators, Journal of Applied Physics 120, 224903 (2016). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4972102>

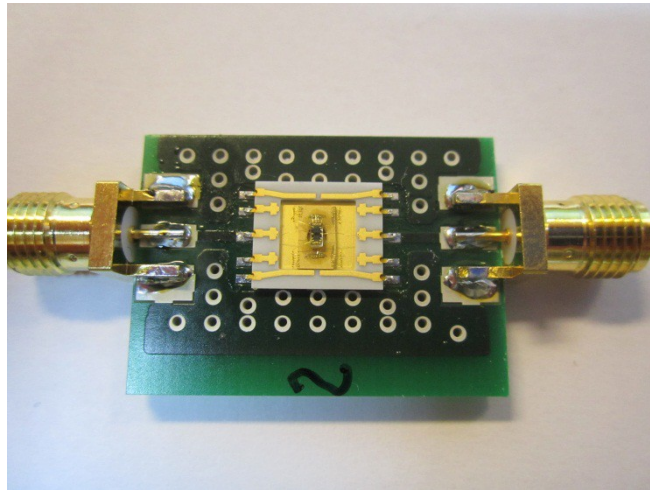
Proceedings:

Rodolphe Boudot, Gilles Martin, Jean-Michel Friedt and Enrico Rubiola Characterization of high-overtone bulk acoustic resonators : applications to ultra-low noise microwave oscillators and miniature atomic clocks, ESA Microwave Technology and Technique Workshop, 03-05 April 2017, Noordwijk (The Netherlands).

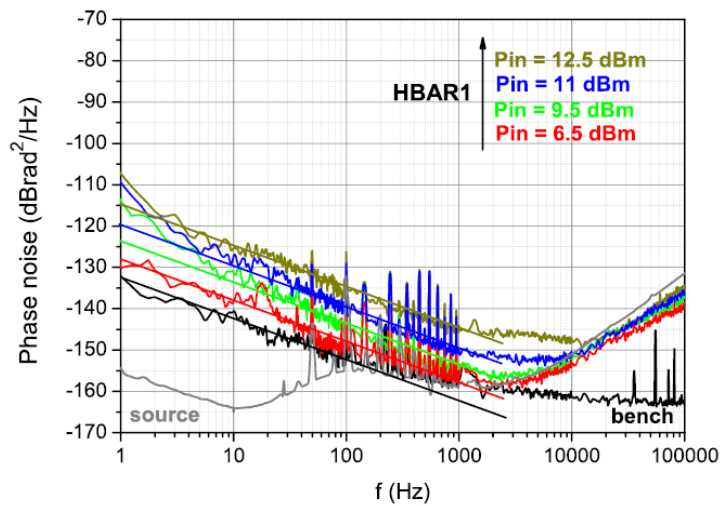
Oral communications:

Rodolphe Boudot, Gilles Martin and Jean-Michel Friedt A HBAR-oscillator-based 4.596 GHz frequency source : design, characterization and application to a Cs micro-cell atomic clock, Proceedings of the European Frequency Time Forum , 04-07 April 2016, York (UK).

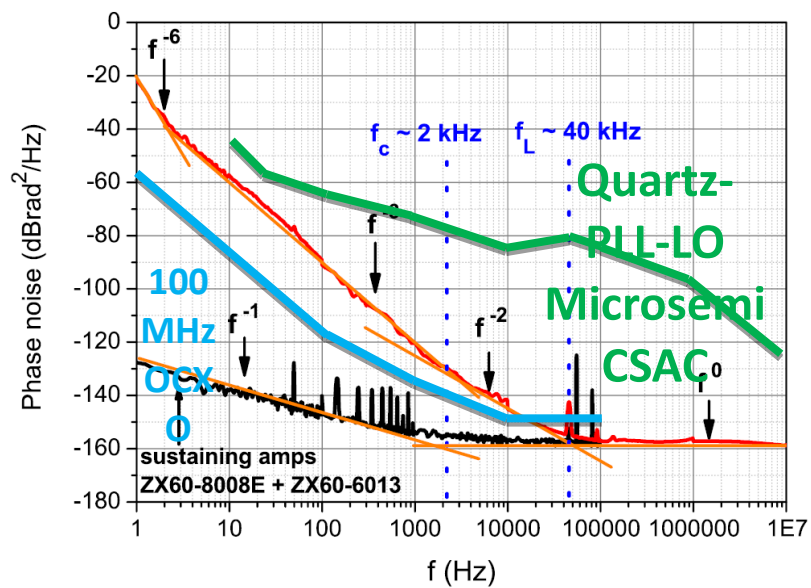
Pictures with captions (curve, photo, scheme ...):



AlN-Sapphire HBAR (design by CEA-LETI)



Residual phase noise of a HBAR at 2.3 GHz, for several microwave input powers.



Phase noise performances of the 2.3 GHz HBAR oscillator (red) in comparison with the phase noise of a typical miniature atomic clock local oscillator (green) or a frequency-multiplied 100 MHz oscillator.