

Évaluation d'une source VECSEL bifréquence et bipolarisation pour l'horloge atomique à piégeage cohérent de population

Evaluation of a dual -frequency dual-polarization VECSEL for CPT atomic clock

Porteur(s) : G. Lucas-Leclin (LCF)

Partenaire(s) : S. Guérandel (SYRTE)

Résumé du projet en Français :

Le Laboratoire Charles Fabry (LCF) s'intéresse depuis quelques années au développement de sources laser destinées à la métrologie, en s'appuyant sur la technologie des lasers à semi-conducteur pompés optiquement en cavité externe, ou OP-VECSEL. Dans ces lasers, la structure semi-conductrice impose la longueur d'onde d'émission, tandis que le pompage optique et l'utilisation d'une cavité externe permettent d'émettre de fortes puissances et d'assurer une émission monomode longitudinale. De plus, nous avons récemment obtenu l'émission simultanée autour de 852 nm, à partir d'un tel laser, de deux fréquences optiques sur deux polarisations croisées, cohérentes en phase et pouvant être séparées de plusieurs GHz. Cette émission est obtenue par l'insertion dans la cavité laser de composants biréfringents. Compte tenu de l'accordabilité optique et micro-onde et des performances de bruit attendues, un laser bifréquence de ce type pourrait être implanté dans une expérience d'horloge atomique à piégeage cohérent de population dans le césium comme celle développée au SYRTE. Les structures semi-conductrices à 852 nm aujourd'hui disponibles au LCF présentent un gain optique faible, et ne sont pas adaptées à un pompage de forte puissance, ce qui limite en pratique la puissance extraite des lasers OP-VECSEL.

Abstract in English:

For several years, the Charles Fabry Laboratory (LCF) is interested in the development of laser sources for metrology using the optically-pumped semiconductor laser technology (OP-VECSEL). In these lasers, the semiconductor structure imposes the emission wavelength, while optical pumping and external cavity make it possible to emit high powers in a single longitudinal monomode operation. In addition, we recently obtained the simultaneous emission of two optical frequencies on two crossed polarizations around 852 nm, where the two frequencies are coherent and separated by a few GHz. This dual-frequency operation of a single laser is obtained by inserting birefringent components inside the cavity. Such a dual frequency laser is expected to have the proper laser properties and noise performances compatible with their implementation in a CPT (coherent population trapping) atomic clock experiment in cesium. Nevertheless, the 852 nm semiconductor structures currently available have a low optical gain, and are not suitable for high power pumping, which limits the maximum power extracted from the OP-VECSEL lasers.

Résultats marquants :

Au cours de la thèse financée par le LabEx FIRST-TF, nous avons réalisé un laser à émission bifréquence et bipolarisée émettant à 852 nm, basé sur la technologie des OP-VECSEL et destiné au piégeage cohérent de population des atomes de césium. Nous avons en particulier été en mesure d'accorder la différence entre les deux raies laser autour de 9 GHz tout en stabilisant une fréquence absolue sur une transition optique du Cs. La puissance laser extraite est de l'ordre de 10 mW sur chaque polarisation. Un premier signal de spectroscopie CPT en interrogation continue a été obtenue avec cette source, qui met clairement en évidence les résonances attendues. Les caractéristiques spectrales du laser bifréquence (bruit de fréquence, bruit de phase et bruit d'intensité sur chaque polarisation et leurs corrélations) ont été soigneusement évaluées et comparées aux prévisions théoriques. La stabilité d'horloge qui en résulte a été estimée à $1,9 \cdot 10^{-11}$ sur une seconde, limitée par le bruit d'intensité du laser.

Highlights:

During the thesis funded by the LabEx FIRST-TF, we have developed a two-polarization two-frequency laser emitting at 852 nm, based on the OP-VECSEL technology for the coherent population trapping of cesium atoms. We were able to simultaneously stabilize the laser line on a Cs optical transition and tune the frequency difference around 9 GHz. The extracted laser power is about 10 mW on each polarization. A preliminary CPT spectroscopy signal under continuous interrogation was obtained with our dual-frequency laser. The spectral properties of the source – frequency, phase and intensity noise on each polarization, and their correlations - have been carefully evaluated and compared to theoretical predictions. The resulting clock stability was estimated at $1.9 \cdot 10^{-11}$ over one second, limited by the laser intensity noise.

Publications and communications linked with the funded project:

Peer-reviewed articles:

Paul Dumont, Fabiola Camargo, Jean-Marie Danet, David Holleville, Stéphane Guerandel, Grégoire Pillet, Ghaya Baili, Loïc Morvan, Daniel Dolfi, Iryna Gozhyk, Grégoire Beaudoin, Isabelle Sagnes, Patrick Georges, Gaëlle Lucas-Leclin, *Low-noise dual-frequency laser for compact Cs atomic clocks*, paru dans *Journal of Lightwave Technology*, special issue on Microwave Photonics (2014) vol. 32 n°20 10.1109/JLT.2014.2318179 (2014)

<https://hal-iogs.archives-ouvertes.fr/hal-01060557v1>

Proceedings:

Paul Dumont, Fabiola Camargo, Jean-Marie Danet, David Holleville, Stéphane Guerandel, Ghaya Baili, Loïc Morvan, Grégoire Pillet, Daniel Dolfi, Iryna Gozhyk, Grégoire Beaudoin, Isabelle Sagnes, Patrick Georges, Gaëlle Lucas-Leclin, "Generation of a high purity microwave signal from a dual-frequency op-vecsel for cpt-based atomic clocks", 6th International Symposium On Optronics In Defence and Security (28-30 January 2014 – Paris) proceedings publié sur le site *OPTRO2014.com / Lasers Sensors & Systems* – 11 p

<https://hal-iogs.archives-ouvertes.fr/hal-01074041v1>

Fabiola Camargo, Gaëlle Lucas-Leclin, Paul Dumont, Patrick Georges, Jean-Marie Danet, David Holleville, Stéphane Guerandel, Grégoire Pillet, Ghaya Baili, Loïc Morvan, Daniel Dolfi, Iryna Gozhyk, Grégoire Beaudoin, Isabelle Sagnes, "Generation of high purity microwave signal from a dual-frequency OP-VECSEL", Proc. SPIE 8966, Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELs) IV, conférence invitée (1-6 février 2014) - *Proc. SPIE 8966*, Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELs) IV, 89660L (March 7, 2014); doi: 10.1117/12.2041669 – [oral conférence invitée](#)

<https://hal-iogs.archives-ouvertes.fr/hal-00959737v1>

P. Dumont, J.-M. Danet, F. Camargo, D. Holleville, S. Guerandel, G. Baili, L. Morvan, G. Pillet, D. Dolfi, I. Gozhyk, G. Beaudoin, I. Sagnes, P. Georges, G. Lucas-Leclin "Evaluation of the noise properties of a dual-frequency VECSEL for compact Cs atomic clocks" High-Power Diode Laser Technology and Applications XII, SPIE Photonics West, paper 9349-27 (San Francisco, USA) 7-12 Feb 2015 - [poster](#) – *Proc. SPIE 9349*, Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELs) V, 93490S (March 4, 2015); doi:10.1117/12.2077663

<https://hal-iogs.archives-ouvertes.fr/hal-01171371v1>

Oral communications:

F. A. Camargo, P. Dumont, G. Lucas-Leclin, P. Georges, J.-M. Danet, D. Holleville, S. Guerandel, I. Sagnes, G. Baili, L. Morvan et D. Dolfi "Emission bifrèquence d'un laser à semiconducteur en cavité externe à 852 nm pour les horloges atomiques à césium", *COLOQ '13*, Villetaneuse – [poster](#) (Juillet 2013)

F. A. Camargo, P. Dumont, G. Lucas-Leclin, P. Georges, J.-M. Danet, D. Holleville, S. Guerandel, I. Sagnes, N. Girard, G. Baili, L. Morvan, G. Pillet et D. Dolfi, "Emission bifrèquence d'un laser à semiconducteur en cavité externe à 852 nm pour les horloges atomiques à CPT", *Journée du Club Optique & MicroOndes 2013*, Palaiseau, 20 Juin 2013 – [poster](#)

Fabiola Almeida Camargo, Paul Dumont, Iryna Gozhyk, Gaëlle Lucas-Leclin, Patrick Georges, Jean-Marie Danet, David Holleville, Stéphane Guerandel, Isabelle Sagnes, Ghaya Baili, Loïc Morvan, Grégoire Pillet, Daniel Dolfi, *Two-cross-polarized-frequency VECSEL at 852nm for CPT-based Cs clocks*, *Advanced Solid-State Lasers '13*, Paris – [poster](#) (27 octobre 2013 – 1er novembre 2013)

P. Dumont, F. A. Camargo, J.M. Danet, D. Holleville, S. Guerandel, G. Baili, L. Morvan, G. Pillet, D. Dolfi, I. Sagnes, P. Georges and G. Lucas-Leclin, *Evaluation of a dual-frequency VECSEL emitting at 852 nm for cesium atomic clocks using coherent population trapping*, 2nd Workshop VECSEL, Montpellier (15-17 Oct. 2013) – [poster](#)

P. Dumont, F. Camargo, P. Georges, G. Lucas-Leclin, J.-M. Danet, D. Holleville, S. Guérandel, G. Pillet, G. Baili, L. Morvan, D. Dolfi, I. Gozhyk, G. Beaudoin, I. Sagnes « *High-purity microwave signal from a dual-frequency semiconductor laser for CPT atomic clocks* », European Frequency & Time Forum 2014, Neuchatel (23-26 Juin 2014) – [poster](#)

P. Dumont, F. A. Camargo, J.-M. Danet, D. Holleville, S. Guerandel, G. Baili, L. Morvan, G. Pillet, D. Dolfi, I. Gozhyk, G. Beaudoin, I. Sagnes, P. Georges, G. Lucas-Leclin, "Source laser à semiconducteur bifréquence et bipolarisée pour horloges CPT à césium", *Assemblée Générale du LabEx FIRST-TF*, Nice (24-25 Mars 2014)

P. Dumont, J.-M. Danet, D. Holleville, S. Guerandel, G. Baili, L. Morvan, G. Pillet, D. Dolfi, I. Gozhyk, G. Beaudoin, I. Sagnes, P. Georges and G. Lucas-Leclin, "*Spectral and noise characterization of a 852 nm dual-frequency VECSEL*", 3rd Workshop VECSEL (Montpellier – 17 -19 Novembre 2015) – [conférence orale](#)

P. Dumont, J.-M. Danet, D. Holleville, S. Guerandel, G. Baili, L. Morvan, G. Pillet, D. Dolfi, G. Beaudoin, I. Sagnes, P. Georges and G. Lucas-Leclin, "*Dual-frequency VECSEL for atomic clocks using coherent population trapping*", Workshop on Laser Diodes for Space Applications (Palaiseau – 23 -24 Novembre 2015) – [conférence orale](#)

Paul Dumont, J.-M. Danet, D. Holleville, S. Guerandel, G. Baili, et al.. LASER A SEMICONDUCTEUR A 852 NM BIFREQUENCE POMPE OPTIQUEMENT POUR LES HORLOGES ATOMIQUES CPT. *Horizons de l'Optique*, Jul 2015, Rennes, France (2015) - [poster](#)

P. Dumont, S. Janicot, P. Georges, G. Lucas-Leclin, F. Tricot, D. Holleville, S. Guerandel, G. Pillet, G. Baili, L. Morvan, D. Dolfi, G. Beaudoin, I. Sagnes, "VECSEL bifréquence et bipolarize pour horloge atomique à piégeage coherent d'atomes de Cs", *Assemblée Générale du LabEx FIRST-TF*, Villeteneuse (Mars 2016) [conférence orale](#)

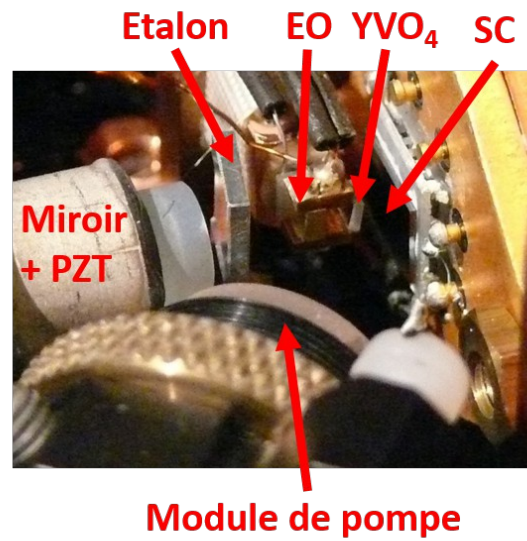
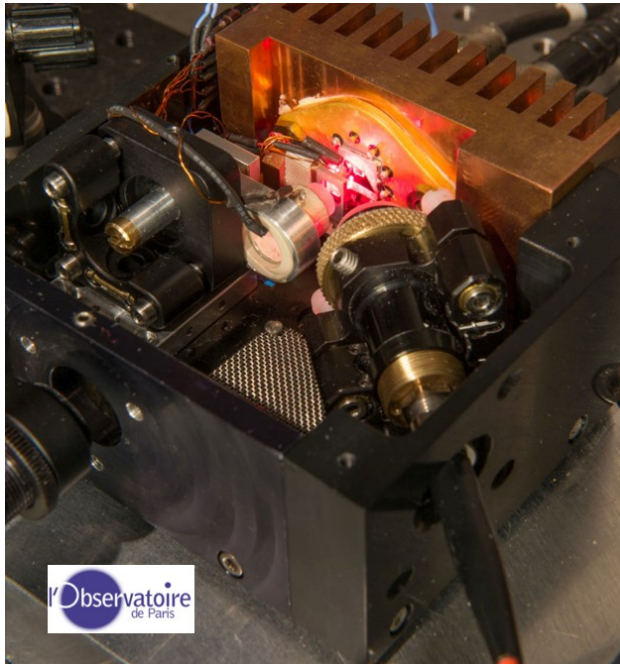
Invited talks:

Fabiola Camargo, Gaëlle Lucas-Leclin, Paul Dumont, Patrick Georges, Jean-Marie Danet, David Holleville, Stéphane Guerandel, Grégoire Pillet, Ghaya Baili, Loïc Morvan, Daniel Dolfi, Iryna Gozhyk, Grégoire Beaudoin, Isabelle Sagnes, "*Generation of high purity microwave signal from a dual-frequency OP-VECSEL*", Proc. SPIE 8966, Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELS) IV, conférence invitée (1-6 février 2014) *Proc. SPIE 8966*, Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELS) IV, 89660L (March 7, 2014); doi: 10.1117/12.2041669 – [oral conférence invitée](#)

<https://hal-iogs.archives-ouvertes.fr/hal-00959737v1>

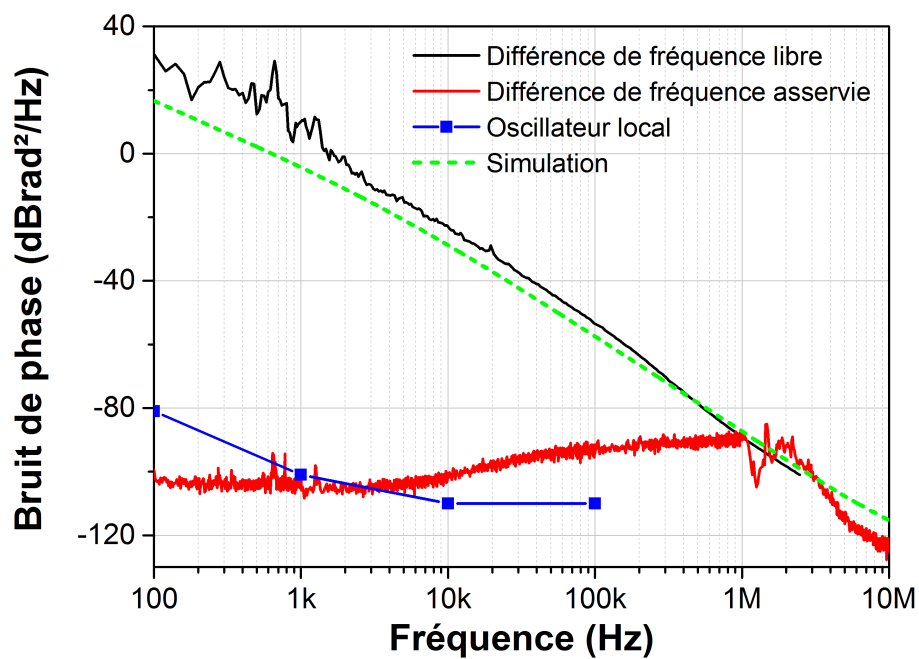
P. Dumont, G. Lucas-Leclin, P. Georges, D. Holleville, S. Guerandel, G. Baili, L. Morvan, D. Dolfi, G. Beaudoin, I. Sagnes, "Dual-frequency laser sources for CPT atomic clocks", Workshop on compact and miniature atomic clocks (Paris, 2016) – [conférence invitée](#)

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

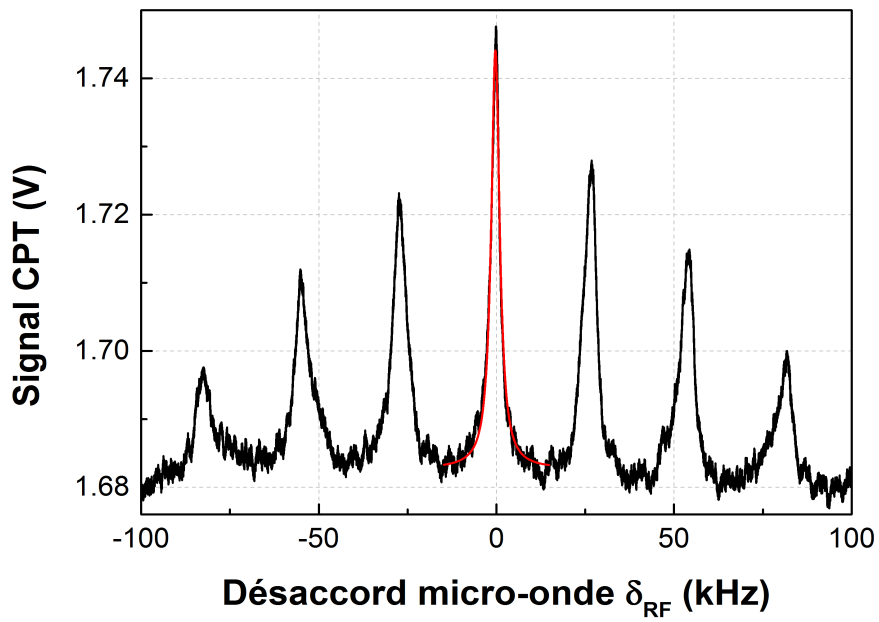


19

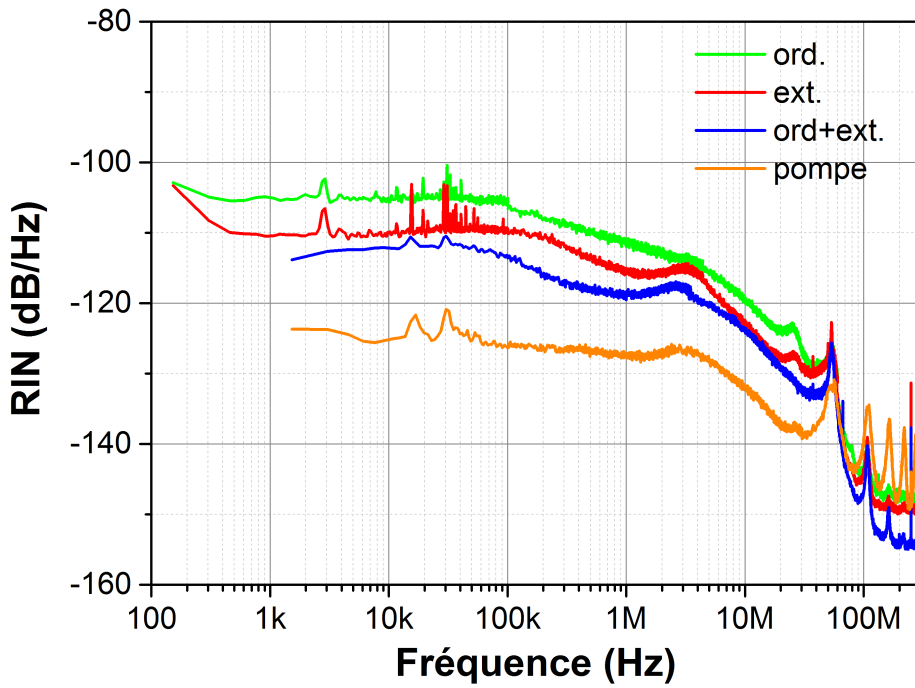
Photograph of the dual-frequency laser prototype



Experimental phase-noise spectral densities of the laser beatnote with (red) and without (black) phase stabilization, compared with the theoretical phase-noise spectral density resulting from the pump-induced thermal shift of the laser frequencies (green dashed curve).



Experimental measurement of the seven CPT resonances achieved with the tuning of the frequency difference around the microwave atomic frequency.



Relative intensity noise (RIN) spectral densities of the pump source (orange) and the dual-frequency laser under standard operating conditions.