

ASSERVISSEMENTS DE FRÉQUENCE ET D'INTENSITÉ D'UN PROTOTYPE DE VECSEL BIFRÉQUENCE À 852 NM POUR UNE HORLOGE ATOMIQUE CPT

Jérémie Cotxet^{1,2}, François Gutty¹, Ghaya Baili¹, David Holleville²,
Stéphane Guérandel², Loïc Morvan¹, Daniel Dolfi¹

¹Thales Research & Technology, 1 Avenue Augustin Fresnel, 91767 Palaiseau Cedex, France

²LNE-SYRTE, Observatoire de Paris, UMR 8630, 61 Avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France

Pour répondre aux besoins grandissant de références de temps ultrastables, des études récentes ont permis le développement d'horloges atomiques sur cellules de hautes performances, présentant des stabilités relatives de fréquence de quelques 10^{-13} à 1 s et descendant jusqu'à quelques 10^{-15} à 10 000 s [1]. Ces horloges se basent sur le phénomène de piégeage cohérent de population (*Coherent Population Trapping* ou CPT) qui apparait quand les atomes sont illuminés par deux fréquences optiques dont l'écart correspond à la fréquence de la transition hyperfine (9.2 GHz dans le cas du césium). Afin de simplifier et rendre plus compacte la génération de ce champ bifréquence, nous proposons ici une approche originale basée sur un *Dual Frequency Vertical External Cavity Surface Emitting Laser* (DF-VECSEL) à 852 nm (raie d'absorption D₂ du césium) dont l'architecture permet l'oscillation simultanée de deux polarisations croisées et séparées, de manière contrôlée, de 9.2 GHz [2]. La dynamique de classe A du laser, associée au couplage entre les états propres du VECSEL et aux propriétés du pompage, confèrent aux deux fréquences optiques des corrélations d'intensité. Ces dernières ont fait l'objet d'études approfondies, en particulier portant sur leur optimisation pour réduire le bruit d'intensité relatif (*Relative Intensity Noise* ou RIN) et le bruit de phase du battement [3]. Dans le présent papier, nous proposons une architecture modifiée du VECSEL bifréquence bipolarisation associée à un circuit électronique permettant, pour la première fois, d'asservir simultanément et indépendamment les deux fréquences optiques. Sur cette même architecture, nous évaluons la stabilisation simultanée des deux intensités optiques sur une référence commune. Enfin, nous discutons les résultats obtenus et leur applicabilité à l'horloge Cs CPT en cours de construction.

L'architecture du DF-VECSE est présentée ci-dessous. Il s'agit d'un $\frac{1}{2}$ -VCSEL en cavité externe.

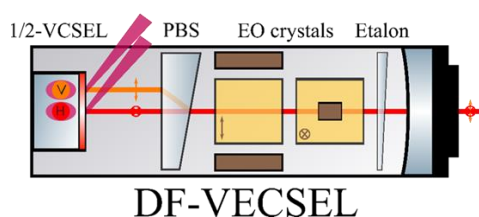


Figure 1 : Gauche : Architecture du VECSEL bifréquence bipolarisation. $\frac{1}{2}$ -VCSEL : milieu à gain, PBS : Polarisation beam Splitter YVO₄, EO : Cristal MgO:SLT, Etalon : filtre biréfringent YVO₄. Droite : Photo du cœur du prototype du VECSEL.

L'oscillation simultanée des deux états propres de polarisation est obtenue en diminuant le couplage non linéaire via une séparation spatiale des deux modes sur le $\frac{1}{2}$ -VCSEL. Ici, la séparation spatiale est choisie égale à 190 μ m, combinée avec un pompage optique double-spot. Quand les fluctuations des deux faisceaux de pompe sont corrélées, nous montrons que les fluctuations d'intensité des deux états propres de polarisation sont fortement corrélées (proche de 1) et en phase. Deux cristaux électro-optiques (EO) en MgO:SLT sont insérés tête-bêche dans la cavité laser. En plus de réduire l'effet thermo-optique inhérent aux cristaux utilisés, il est ainsi possible de contrôler la fréquence d'émission de chacun des modes laser indépendamment grâce à une combinaison linéaire de

tensions appliquées aux cristaux EO. Pour stabiliser l'émission laser, deux asservissements sont mis en place simultanément. D'une part, la fréquence optique d'un mode de polarisation est asservie sur le flanc d'une frange d'interféromètre dont le discriminateur de fréquence est représentatif de celui d'une transition atomique (~ 1 V/MHz). D'autre part, la fréquence du second mode est asservie par une boucle à verrouillage de phase sur un oscillateur local à quelques gigahertz. Les résultats des réductions de bruits associées sont présentés en Figure 1.b et 1.c. Une forte réduction des bruits est mesurée pour des fréquences de Fourier inférieures à 100 kHz. Cette limite de correction est donnée par la bande passante des amplificateurs de tensions utilisés pour contrôler les EO.

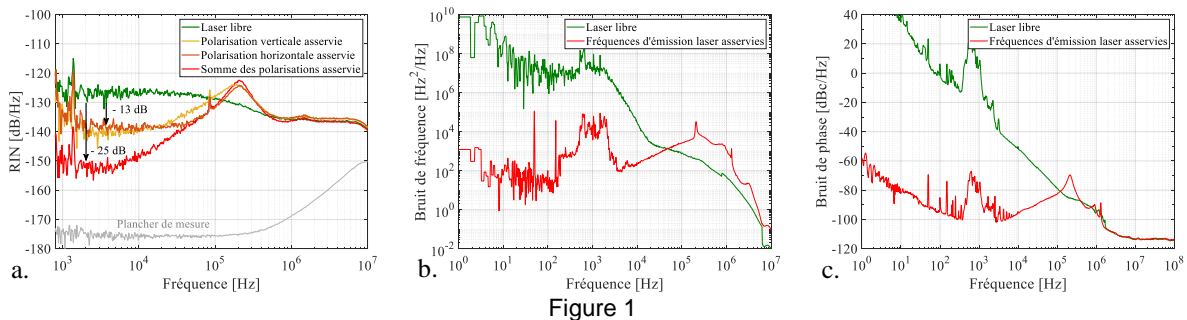


Figure 2: a. Spectres de RIN du VECSEL asservi en puissance. b. Spectres de bruit de fréquence du mode de polarisation vertical asservi. c. Spectres de bruit de phase du battement entre les modes laser asservi.

La stabilisation de la puissance optique est réalisée en ajustant la transmission d'un modulateur acousto-optique pour maintenir le signal détecté par une photodiode égal à une tension de référence à bas bruit [4]. Grâce à l'architecture de pompage du VECSEL, dite *double spot*, les intensités optiques des deux états propres sont fortement corrélées et en phase. Cette propriété de la cavité permet de réduire simultanément les fluctuations des deux modes avec un unique signal de détection. Deux configurations ont ainsi été étudiées : (i) détection des fluctuations d'une seule polarisation ou (ii) détection des fluctuations des deux polarisations croisées. La Figure 1.a illustre les spectres de RIN de chacune des polarisations et de leur somme dans le cas (ii). Une réduction de RIN de 13 dB identique sur chacune des polarisations est mesurée tandis qu'une réduction plus importante, de 25 dB, jusqu'au niveau de bruit de la tension de référence, est relevée sur la somme des polarisations. Une modélisation analytique du système en boucle fermée permet de déterminer les limites théoriques d'un tel asservissement et de prédire le fort impact des corrélations et de l'équilibre entre les deux intensités. En particulier, la partialité des corrélations entre les deux intensités (amplitude de 0.9) limite ici la réduction de RIN de chacun des modes laser quand c'est leur somme qui est asservie

La stabilisation de la puissance optique ainsi que les asservissements simultanés des fréquences optiques émises par un prototype de DF-VECSEL à 852 nm ont été réalisés. Il a ainsi été montré que la réduction du RIN est limitée par l'amplitude des corrélations entre les bruits d'intensité des deux modes. Le contrôle simultané des deux fréquences optiques grâce à une architecture optique modifiée et un circuit électronique adapté a aussi été validé pour la première fois et permet une réduction simultanée des bruits de fréquence et de phase du laser. L'étude d'un montage d'horloge CPT complet est actuellement limitée par l'offset de la longueur d'onde centrale de la raie D2 du Cs. Les travaux sont en cours pour réduire les pertes générées par l'introduction des différents éléments optiques intra-cavité et ainsi obtenir une émission laser intense et résonante avec le césium.

Références :

- [1] M. Abdel Hafiz et al., "Toward a High-Stability Coherent Population Trapping Cs Vapor-Cell Atomic Clock Using Autobalanced Ramsey Spectroscopy", *Physical Review Applied* 9, 064002, 2018.
- [2] P. Dumont et al., "Low-noise dual-frequency laser for compact Cs atomic clocks", *Journal of Lightwave Technology*, 32.20 : 3817-3823, 2014.
- [3] G. Gredat et al., "Optimization of laser dynamics for active stabilization of DF-VECSELs dedicated to cesium CPT clocks", *J. Opt. Soc. Am. B* 37, 1196-1207, 2020.
- [4] F. Tricot et al., "Power stabilization of a diode laser with an acousto-optic modulator", *Review of Scientific Instruments*, 89(12):113112, 2018.