

Laser ultra-stable à l'aide de cristaux dopés terre-rares à température cryogénique

Ultra-stable laser based on rare-earth-doped crystal at cryogenic temperature

Porteur(s) : Y. Le Coq (SYRTE)

Partenaire(s) : Y. Kersalé (FEMTO-ST)

Résumé du projet en Français :

Il s'agit de développer un laser continu asservi en fréquence par une méthode nouvelle sur une structure spectrale photo-inscrite dans un cristal dopé terre-rare, maintenu à température cryogénique (~ 4 K). L'objectif est d'obtenir un laser présentant de meilleures performances métrologiques (stabilité, bruit de phase, largeur de raie) que ce qui se fait actuellement de mieux au monde à l'aide de cavités Fabry-Pérot de haute finesse. Ces derniers dispositifs sont en effet aujourd'hui limités par la limite fondamentale liée à l'agitation thermique des atomes composants la cavité Fabry-Pérot. Les lasers asservis sur trous brûlés à température cryogénique ont le potentiel de largement dépasser les systèmes à base de cavité Fabry-Pérot existants, ce que nous souhaitons démontrer et appliquer dans les années à venir. A terme, les performances de ce laser seront utilisées pour améliorer les horloges optiques du LNE-SYRTE, ainsi que la source optique de référence à $1,5 \mu\text{m}$ de longueur d'onde qui est disséminée par fibre-optiques via le réseau REFIMEVE+ vers plusieurs laboratoires partenaires.

Abstract in English:

Our project aims at realizing a high performance frequency-stabilized cw laser by using a frequency-lock on a spectral structure photo-imprinted in a rare-earth-doped crystal at cryogenic temperature (~ 4 K). We plan to obtain a laser with exceptional metrological performance (frequency stability, phase noise, linewidth), much better than what is currently obtained with high Finesse Fabry-Pérot cavities based systems. As a matter of facts, these last systems are nowadays limited in their performance by fundamental processes related to thermal agitation of the atoms in the bulk material. Laser systems frequency stabilized onto rare-earth-doped crystals at cryogenic temperatures have the potential to go far beyond the existing Fabry-Pérot-based systems, which we plan on demonstrating and using in the next years.

Ultimately, the performance of the laser we develop will be used to improve the LNE-SYRTE optical clocks, as well as the optical reference that is disseminated by long-haul fiber optics links to various FIRST-TF partners via the REFIMEVE+ network.

Résultats marquants :

Il s'agit du montage de zéro d'un nouveau dispositif. Au LNE-SYRTE, le dispositif, avec l'aide financière du Labex et des autres co-financeurs, nous avons installés un nouveau laboratoire dédié (environnement dépoussiéré, thermo-régulé, hygro-régulé), équipé d'une table optique, d'un cryostat 4K à circuit fermé et très haute stabilité de température et de vibration. Un système laser à diode en cavité étendue à 1160 nm a été développé et une cavité ultra-stable de très haute finesse pour la pré-stabilisation du laser installée. Un système doubleur de fréquence de 1160 nm vers 580 nm a été également réalisé qui fournit plusieurs mW de puissance utile pour la spectroscopie de trous brûlés de l'Eu:YSO. La chaîne laser à 1160 nm est également connectée à un lambda-mètre de haute performance du laboratoire et au système de peigne de fréquences optiques afin de caractériser sa fréquence optique et ses performances métrologiques (stabilité, largeur de raie optique, etc.).

Les premiers signaux de trous brûlés dans l'Eu:YSO ont été obtenus en 2013. Le système laser a également depuis été asservi sur la cavité de référence ultra-stable et nous travaillons actuellement à la réalisation de trous brûlés spectraux à très haute résolution. Un système de génération de forme d'onde arbitraire programmable en temps

réel par FPGA contrôlé par ordinateur a été également approvisionné et est en cours d'implémentation sur le dispositif expérimental. A FEMTO-ST une enceinte de cryostat à tube pulsé de prochaine génération a été conçue, approvisionnée et est en cours d'assemblage. Celle-ci permettra de mettre l'échantillon cristallin dans un environnement de très faible vibration, de très haute stabilité en température, et sous une pression d'Hélium contrôlée afin d'atteindre les conditions « magiques » de température et pression permettant d'annuler au premier ordre l'effet des instabilités de température résiduelle sur la position des raies étroites spectrales de trou brûlé.

En 2016 et 2017, nous avons obtenus des structures de trou brûlé étroites de 4kHz FWHM environ et pu démontrer le principe d'un asservissement du laser sur ces trous brûlés avec une stabilité démontrée de $2 \cdot 10^{-14}$ à 1s. Les travaux se poursuivront maintenant pour aller vers l'amélioration des performances à court terme via l'optimisation des techniques d'interrogation et d'asservissement, et de la stabilité environnementale du cristal dopé terre-rare à température cryogénique.

Highlights:

We are building a new experiment from scratch aiming at realizing an ultra-stable laser based on narrow spectral features photo-imprinted in a rare-earth-doped crystal at cryogenic (< 4 K) temperatures. This technology, novel in its application to high precision measurement and frequency metrology, has the potential to go beyond the existing room temperature Fabry-Perot stabilized lasers that are commonly used in optical clocks experiments. Ultimately, we want to realize a laser with stability in the 10^{-17} level at 1s, and transfer the spectral purity thus obtained to other wavelengths (by use of an optical frequency comb), in particular that used for probing optical lattice clocks, which would allow them to reach their fundamental limit set by the quantum projection noise.

In 2016 and 2017, we have obtained experimentally spectral features as narrow as 4 kHz and demonstrated locking a laser to such narrow spectral holes with a measured stability of $2 \cdot 10^{-14}$ at 1s. The work effort is now settings toward optimizing the probing and servo technique, as well as the environmental stability of the cryogenically cooled rare-earth-doped crystal, in order to reach lower instability levels.

Publications and communications linked with the funded project:

Peer-reviewed articles:

O. Gobron, K. Jung, N. Galland, K. Predehl, R. Le Targat, A. Ferrier, P. Goldner, S. Seidelin and Y. Le Coq, "Dispersive heterodyne probing method for laser frequency stabilization based on spectral hole burning in rare-earth-doped crystals", *Optics Express* 25, 15539.

Proceedings:

O. Gobron, K. Jung, K. Predehl, D. Nicolodi, R. Le Targat, S. Seidelin, A. Ferrier, P. Goldner and Y. Le Coq, "Toward a highly stable master laser for interrogation of SYRTE's Sr and Hg optical lattice clocks, CLEO 2016, San Jose, CA, USA 2016.

Invited talks:

Y. Le Coq, O. Gobron, K. Jung, K. Predehl, R. Le Targat, A. Ferrier, P. Goldner, S. Seidelin, "Rare-earth stabilized laser for optical clocks", *Physics of Quantum Engineering 2017, Snowbird Utah, USA, 2017.*

Others:

Poster at EFTF/IFCS 2017 (Besançon)

Poster at EFTF/IFCS 2013 (Prague)

Poster "journées nano-K 2013"

Poster "journée IFRAF 2013"

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

SHB laser stabilisation at SYRTE: Setup Sept 2013

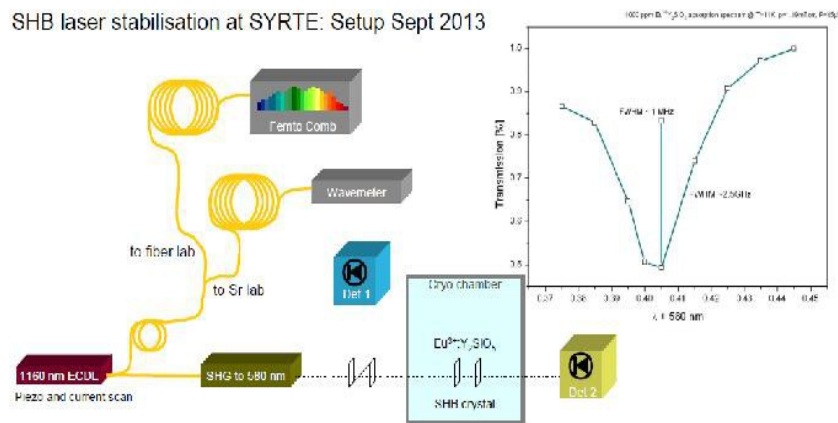
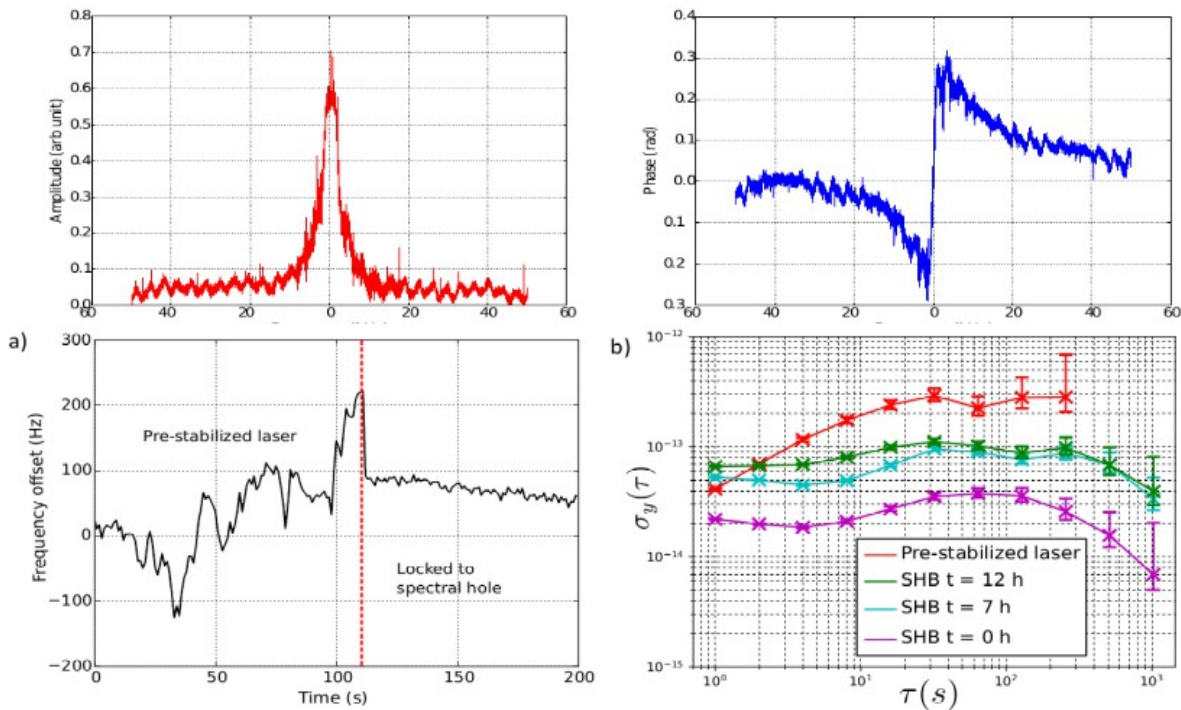


Schéma du montage expérimental au LNE-SYRTE ayant permis d'observer les premiers signaux expérimentaux de trous brûlés dans Eu:Y₂SiO₅. A droite : spectre d'absorption obtenus par élargissement inhomogène avec un trou brûlé en son centre. Dans cette première expérience, le trou brûlé à une largeur de 1 MHz environ car le laser l'ayant photo-imprimé n'était pas encore pré-stabilisé sur cavité Fabry-Pérot de très haute finesse.



Signaux d'absorption (en haut à gauche) et de dispersion (en haut à droite) correspondant à un trou brûlé spectral de 4 kHz utilisé pour l'asservissement du laser. En bas à gauche, trace temporelle du signal de mesure de stabilité de fréquence du laser avant et après asservissement sur le trou brûlé spectral. En bas à droite, stabilité correspondante après stabilisation, observée à divers moment d'un asservissement appliqué pendant plusieurs heures en continu. La dégradation observée sur les temps longs correspond à l'élargissement du trou brûlé spectral au cours du temps, par processus de « sur-brûlage » par le laser de sonde.