

Rubidium vapour-cell frequency standards: metrology of optical and microwave frequency references

Cette thèse porte sur le développement, l'étude et l'optimisation de références de fréquence compactes de hautes performances à base de cellules de vapeur de rubidium (Rb^{1}). Plus particulièrement, deux références de fréquence à cellules à vapeur de Rb sont étudiées : une référence de fréquence optique à $1,5 \mu\text{m}$ et une horloge atomique à double résonance à pompage optique pulsé (POP). L'utilisation de cellules à vapeur permet de réaliser des références de fréquence compactes (i.e. dans un volume de quelques litres) ayant une stabilité de fréquence relative (1) pour une horloge atomique micro-onde au niveau de 1×10^{-14} à 1 jour (équivalent à 1 ns/jour) et (2) pour la référence optique au niveau de 1×10^{-11} à 1 jour (équivalent à environ 4 kHz/jour). Ces références de fréquence compactes peuvent être utilisées dans l'industrie, les télécommunications, la navigation ou comme référence de fréquence optique embarquée (par ex. LIDAR).
La première partie de cette thèse évalue la stabilité de fréquence à moyen et long terme d'une horloge atomique POP compacte de haute performance. Cela consiste à évaluer la sensibilité de la fréquence de l'horloge aux grandeurs pertinentes : fluctuations de fréquence et d'intensité du laser (effets de décalage de fréquence due à lumière (LS)), puissance micro-onde (décalages de fréquence due à la puissance micro-ondes), et effets environnementaux (effets barométriques, température). L'impact de telles perturbations est quantifié en utilisant (1) un coefficient de sensibilité, ou coefficient de décalage de fréquence, défini comme la variation de la fréquence d'horloge par rapport au paramètre physique perturbateur (par exemple une variation de puissance $\#_{\text{clock}}^{\text{p}}$, $\#_{\text{V}_{\text{clock}}}^{\text{p}}$; et (2) l'amplitude des fluctuations du paramètre physique perturbateur lui-même évalué à différentes échelles de temps, $\#_{\text{p}}^{\text{p}}$). Les coefficients de sensibilité de l'effet LS et du décalage due à la puissance micro-onde sont minimisés, contribuant à l'instabilité de fréquence de l'horloge en dessous de 10^{-14} dans le long terme (fluctuation de fréquence relative).
Un effet barométrique est démontré dans les étalons de fréquence à cellule de vapeur. La fluctuation naturelle de la pression atmosphérique déforme la cellule en verre, ce qui modifie la pression interne du gaz. Il en résulte un couplage de la fréquence de l'horloge avec la pression atmosphérique. Le phénomène est caractérisé expérimentalement et théoriquement, et la contribution de l'effet barométrique est réduite en dessous de 10^{-14} . En minimisant l'effet barométrique, la sensibilité à la puissance micro-ondes et l'effet LS, on démontre une stabilité de fréquence de notre prototype d'horloge POP de 1×10^{-14} (fluctuation de fréquence relative) à 10^{-4} secondes de temps d'intégration.
Des études plus fondamentales sont menées sur l'origine du décalage de fréquence dû à la puissance micro-onde pour notre prototype d'horloge POP. L'impact de l'inhomogénéité du champ (champ lumineux et champ micro-ondes) sur le signal de Ramsey et la fréquence de l'horloge est étudié numériquement. Sur la base de la distribution d'amplitude du champ micro-onde simulée dans la cellule de l'horloge, le signal de Ramsey mesuré et ses propriétés (contraste, largeur totale à mi-hauteur (FWHM)) sont reproduits par simulations.
La validation de la production additive (impression 3D) pour la fabrication des cavités micro-ondes complexes est démontrée. L'horloge POP et ses possibilités (grâce à l'interrogation pulsée) est utilisée pour évaluer l'homogénéité et la distribution du champ micro-onde de la cavité micro-onde. On démontre que la distribution du champ micro-onde de la cavité fabriqué par impression 3D est équivalente au champ micro-onde d'une cavité de fabrication conventionnelle. De plus, on présente une stabilité de fréquence horloge au niveau de l'état de l'art obtenu avec une horloge ayant une cavité micro-onde fabriquée par impression 3D.
Les études présentées dans cette thèse sont des étapes importantes vers une meilleure compréhension des horloges atomiques à double résonance. L'identification de la principale source d'instabilité de fréquence à long terme (l'effet barométrique) et sa réduction en dessous d'une instabilité de fréquence relative de 10-14 permet de comparer notre prototype d'horloge atomique avec l'état de l'art des horloges atomiques compactes et à haute performance. De plus, ce niveau d'instabilité de fréquence permet de mener de nouvelles études sur les phénomènes physiques auxquels l'horloge atomique est moins sensible. La stabilité de fréquence d'horloge obtenue avec l'horloge possédant une cavité fabriquée par impression 3D est une étape importante vers la commercialisation d'horloges atomiques Rb à double résonance.
La deuxième partie de cette thèse porte sur les références de fréquence optique utilisant une cellule à vapeur de Rb pour la stabilisation en fréquence des lasers à 780 nm , 1560 nm et 1572 nm . Un laser maître de 1560 nm a été stabilisé en fréquence sur une cellule de vapeur de Rb à 780 nm par doublement de fréquence. Un générateur de peigne de fréquence optique a été utilisé pour combler l'espace de 12 nm entre 1572 nm et le laser à 1560 nm . Le système laser a été conçu pour être une référence de fréquence embarquée à 1572 nm pour un système LIDAR spatial ou pour faire du pompage optique pour les horloges atomiques à cellules Rb. La stabilité de fréquence démontrée du laser à 1572 nm est inférieure à 3×10^{-11} (équivalent à 5,8 kHz à 1572 nm) à toutes les échelles de temps et atteint 4×10^{-12} (équivalent à 760 Hz à 1572 nm) à long terme. En outre, la reproductibilité et la répétabilité du schéma de stabilisation de fréquence du laser maître ont été évaluées. La dégradation du bruit de fréquence et du bruit d'intensité par le processus de doublage de fréquence a également été évaluée. La caractérisation des références de fréquence optique permet d'identifier les futurs axes de recherche pour l'application de ces références optiques pour le pompage optique dans les horloges atomiques ou comme références de fréquence embarqué (LIDAR spatial).
¹ Ces travaux ont été menés au Laboratoire Temps-Fréquence de l'Université de Neuchâtel. Ces travaux ont été soutenus par le Fonds national suisse de la recherche scientifique (FNS) : "Precision double-resonance spectroscopy and metrology with stabilised lasers and atomic vapours : applications for atomic clocks and magnetometers" n°. 156621 (2015-2019)., This thesis concerns the development, study, and optimisation of compact and high-performance frequency references based on rubidium (Rb) vapour cells. More specifically, two Rb vapour-cell frequency references are studied: an optical-frequency

reference at 1.5 μm and a double-resonance pulsed optically pumped (POP) atomic clock. The use of vapour cells allows compact frequency references (typically a volume of few litres) and with relative frequency stability (1) for a microwave atomic clock at the level of 1×10^{-14} at 1 day (equivalent to 1 ns/day) and (2) for the optical reference at the level of 1×10^{-11} at 1 day (equivalent to ~4 kHz/day). Such compact frequency references can be applied in industry, telecommunications, navigation, or as an on-board optical-frequency reference (e.g. LIDAR).
The first part of this thesis evaluates the medium- to long-term frequency stability of high-performance, compact POP atomic clocks. It evaluates the POP atomic clock frequency sensitivity to relevant quantities: laser frequency and intensity fluctuations (light-shift (LS) effects), microwave power (microwave-power shifts), and environmental effects (barometric effects, temperature). The impact of such perturbations are quantified using (1) a sensitivity coefficient, or shift coefficient, defined as the variation of the clock frequency with respect to the perturbing physical parameter (e.g. a power variation $\#_{\text{sub}}{p}$), $\#V_{\text{sub}}{\text{clock}}/\#p$; and (2) the amplitude of fluctuation of the perturbing physical parameter itself at various time scales, $\#\text{sub}{p}/\#(t)$. The sensitivity coefficients of the LS effect and the microwave-power shift are minimised, contributing to the clock's long-term frequency instability below 10^{-14} (relative frequency fluctuation).
A barometric effect is demonstrated in vapour-cell frequency standards. The natural fluctuation of the atmospheric pressure deforms the glass body of the vapour cell, which changes the internal gas pressure. It results in a coupling of the clock frequency with the atmospheric pressure. The phenomenon is characterised experimentally and theoretically, and the contribution of the barometric effect is reduced below 10^{-14} . By minimising the barometric effect, the microwave-power sensitivity, and the LS effect, a POP clock frequency stability of 1×10^{-14} (relative frequency fluctuation) at 10^4 seconds of integration time is demonstrated.
More fundamental studies are carried out on the origin of the microwave-power shift in our POP clock prototype. The impact of the field inhomogeneity (light field and microwave fields) on the Ramsey signal and the clock frequency is studied numerically. Based on the simulated microwave-field amplitude distribution in the clock vapour cell, the measured Ramsey signal and its properties (contrast, the full width at half maximum (FWHM)) is reproduced by simulations.
The validation of the additive manufacturing (3D printing) for the fabrication of the complex microwave cavities is demonstrated. The POP clock setup and its possibilities (due to pulsed interrogation) is used to evaluate the homogeneity and the distribution of the microwave field of the 3D-printed microwave cavity. Equivalent microwave-field distribution between the additive manufacturing cavity and the conventional-manufacturing cavity is demonstrated. Short-term frequency stability at the level of the state-of-the-art is presented.
The studies on microwave atomic clocks presented in this thesis constitute important steps towards a better understanding of double-resonance atomic clocks. The identification of the main source of long-term frequency instability and its reduction to below a relative frequency instability of 10^{-14} allows for our atomic clock prototype to be compared with state-of-the-art, compact, high-performance atomic clock. Moreover, this level of frequency instability allows for new studies on the physical phenomena to which the atomic clock is less sensitive to be conducted. The reported clock frequency stability with the additive manufacturing technology is an important step towards the commercialisation of high-performance double-resonance Rb atomic clocks.
The optical-frequency references studied in this thesis used an Rb vapour cell for the frequency stabilisation of lasers at 780 nm, 1560 nm and 1572 nm. A 1560 nm master laser was frequency stabilised to a Rb optical transition at 780 nm using frequency doubling. An optical-frequency comb generator was used to fill the gap of 12 nm between 1572 nm and the laser at 1560 nm. The laser system was designed to be an on-board frequency reference at 1572 nm for spaceborne CO₂ LIDAR systems or optical pumping for Rb cell atomic clocks. The demonstrated frequency stability of the 1572 nm laser at 1572 nm is below 3×10^{-11} (equivalent to 5.8 kHz at 1572 nm) at all time scales reaching 4×10^{-12} (equivalent to 760 Hz at 1572 nm) in the long-term at the state-of-the-art level. In addition, the reproducibility and repeatability of the frequency stabilisation scheme of the master laser were evaluated. The degradation of the frequency noise and the relative intensity noise through the non-linear doubling process were also evaluated. The characterisation of the optical-frequency references identifies the basic elements for future evaluations of applications of optical pumping in atomic clocks or satellite LIDAR on-board frequency references.
¹This work was conducted at the Laboratoire Temps-Fréquence at the University of Neuchâtel. This work was supported by the Swiss National Science Foundation (FNS): "Precision double-resonance spectroscopy and metrology with stabilised lasers and atomic vapours: applications for atomic clocks and magnetometers" no. 156621 (2015–2019).

Publication basic information

Publication date: 2019

DOI: 10.35662/unine-thesis-2761

Authors: Moreno, William (Institut de physique)

Editors: Miletì, Gaetano (Institut de physique)

Keywords: horloge atomique, cellule de vapeur de rubidium, spectroscopie à double résonnance, schéma de pompage optique pulsé (POP), instabilité de fréquence, métrologie, référence de fréquence optique, LIDAR, atomic clock, rubidium vapour cell, double-resonance spectroscopy, pulsed optically pumped (POP) scheme, frequency instability, metrology, Optical frequency reference, LIDAR

Type: http://purl.org/coar/resource_type/c_1843

Publication bibliographic details

Projects

Fundings
