

Studies on miniature and compact Ramsey double-resonance Rubidium atomic clocks using hot vapors and cold atoms

Cette thèse présente deux nouvelles horloges atomiques au Rubidium 87 à double résonance. Le chapitre 3 se concentre sur l'horloge μ POP, la première démonstration d'une horloge double résonance en mode Ramsey dans une cellule à vapeur micro-fabriquée. La stabilité court-terme de $\sigma_{\#}(\tau) \leq 2 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ et la stabilité long-terme de 1.5×10^{-12} à la journée en font l'état de l'art dans la catégorie des horloges micro-onde double résonance dans les cellules micro-fabriquées. Comme démontré dans [1], la stabilité court-terme a été optimisée pour minimiser les contributions de l'effet Dick et de la contribution du bruit d'intensité relatif du laser, avec ce dernier limitant majoritairement les performances de l'horloge à court-terme. Le budget long-terme montre que les effets de light-shift en intensité et en fréquence sont respectivement un et deux ordres de grandeurs en-dessous de la stabilité mesurée de l'horloge à la journée ce qui confirme la validité de l'approche POP pour limiter ces deux effets. Dans la limite supérieure, la contribution du décalage de fréquence dû à la température de la cellule est deux ordres de grandeurs au-dessous de la stabilité mesurée grâce au mélange de gaz tampons N₂ et Ar. Les deux derniers effets évalués, les shifts de puissance micro-onde et de position, permettent d'expliquer les limites de performances de l'horloges à moyen et long-terme. Le shift de position est le facteur limitant au long-terme et est évalué avec soin grâce à la variance de GrosLambert. Les études du μ POP se concluent par la démonstration d'une méthode fiable et rapide pour mesurer les taux de relaxation dans les horloges à cellules double résonance en mode Ramsey. Les valeurs des taux de relaxation de population et de cohérence sont d'environ 5 kHz et 4 kHz respectivement à la température nominale de $\approx 100^\circ\text{C}$. À 60°C , les deux taux tombent à 1 kHz. Ces valeurs sont globalement bien expliquées par le modèle présenté entièrement basé sur des coefficients physiques de la littérature. Dans ces conditions la différence entre le modèle et l'expérience est d'au maximum 20%. Le chapitre 4 démontre la réalisation d'une cavité micro-onde pour une horloge à atomes froids refroidis et piégés à l'aide d'un GMOT. Le facteur de qualité est $Q \approx 360$ ce qui à l'avantage de réduire le shift du cavity-pulling. Le mode de type TE₀₁₁ est séparé d'au moins 500 MHz de ses voisins, comme prédit par les simulations. Ces dernières ont également permis de simuler la fréquence du mode d'intérêt à 60 MHz près qui sont aisément compensés par la gamme d'accordage de la cavité. Les excellentes propriétés du champ magnétique prédites par les simulations en terme d'uniformité et d'homogénéité sont confirmées par la mesure du facteur d'orientation de champ de 97% et l'amortissement faible des oscillations de Rabi, respectivement. Le chapitre 5 décrit les résultats obtenus lors de l'intégration de la cavité micro-onde susmentionnées dans une manipulation d'horloge à atomes froids ayant eu lieu à l'université de Strathclyde dans le groupe d'Erling Riis. Cette horloge est la première démonstration d'une horloge à atomes froids de Rb à double résonance utilisant un GMOT pour le refroidissement et le piégeage des atomes. Cette approche permet de réduire considérablement la taille de l'horloge. En pratique, environ 106 atomes à 10 μK sont piégés grâce à celui-ci. Les franges de Ramsey sont obtenues avec un temps de Ramsey allant jusqu'à 20 ms limité par la géométrie du setup. Le cycle de l'horloge implémente également une phase de sélection d'état quatrique permettant d'augmenter le signal-sur-bruit de l'horloge. La stabilité finale à court-terme est d'environ $1.5 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ et est en adéquation avec la limite estimée à partir du signal-sur-bruit venant des franges de Ramsey. La stabilité long-terme de l'horloge est limitée par le shift de Zeeman 2ème ordre dû à l'absence de blindage magnétique du setup.

ABSTRACT This thesis presents results on two microwave, double-resonance, Rubidium 87 atomic clocks. These studies are motivated by the need for compact and miniature clocks with improved performances or improved Size, Weight and Power (SWaP). A first clock study, covered in chapter 3, focuses on the μ POP clock, the first demonstration of Double Resonance (DR) Ramsey operation in a micro-manufactured hot-vapor cell clock. With a short-term stability of $\sigma_{\#}(\tau) \leq 2 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$ and long-term stability of 1.5×10^{-12} at one day, the μ POP clock features state-of-the-art stability for microwave miniature cell clocks. As demonstrated in [1], the μ POP clock short-term stability has been optimized to mitigate the Dick effect and laser Relative Intensity Noise (RIN) contributions, with the latter being the biggest contributor to the short-term stability. The long-term stability budget shows that the intensity and frequency light shifts contributions are one and two order of magnitudes lower than the measured stability with a contribution of the order of 10^{-13} and 10^{-14} at one day, respectively. This confirms the interest of the Pulsed Optically Pumped (POP) approach compared to the ContinuousWave (CW) scheme and sets the potential performances of the μ POP clock. Other long-term contributors to the instabilities have been evaluated. In the upper limit, the contribution of the cell-temperature shift to the instability is estimated to be two orders of magnitude below the measured stability, confirming the benefit of the N₂ and Ar buffer gas-mixture approach for a close to zero cell-temperature sensitivity coefficient. The last two effects, the microwave-power and the position shifts are the greatest contributor to the mid and long-term stability with the latter being the limiting long-term phenomenon whose contribution must be carefully evaluated using the GrosLambert covariance. The μ POP studies conclude with the description of a fast and reliable method for measuring the relaxation rates in Ramsey DR vapor-cell clocks. At the nominal cell temperature, namely $\approx 100^\circ\text{C}$, the population and coherence relaxations rates are measured to be at the order of 5 kHz and 4 kHz, respectively. Their values have been measured down to 60°C with both at the order of 1 kHz. Finally, a theoretical model using only parameters taken from the literature has been derived to describe the measured relaxation rates values with agreement within 20%. Chapter 4 focuses on the simulation and realization of a microwave cavity for a DR cold-atom clock using a Grating Magneto-Optical Trap (GMOT). The final cavity shows a low quality factor of $Q \approx 360$ which is in the interest of reducing the cavity-pulling shift. The TE₀₁₁-like cavity mode is separated by at least 500 MHz from the neighbouring modes as predicted by the simulations. The same simulations allowed to effectively predict the cavity's resonance frequency with a small error of 60 MHz which can easily be compensated by the cavity frequency tuning mechanism. The expected simulated excellent properties of the resonance mode in terms of microwave field uniformity and homogeneity

are confirmed by measurement of the field field orientation factor of 97% and low Rabi oscillation damping, respectively. Chapter 5 focuses on the integration of the microwave cavity in a clock setup designed by Erling Riis group from the university of Strathclyde. The clock described in this chapter is the first realization of a DR Ramsey Rb cold-atom clock using a GMOT for cooling and trapping which reduces the clock footprint. In practise, ≈ 106 atoms at $\approx 10 \mu\text{K}$ are loaded thanks to the grating. Ramsey fringes were successfully obtained with Ramsey times up to 20 ms, limited by the clock geometric design. The clock implements state-selection that allows for increased Signal-to-Noise Ratio (SNR) and better short-term stability of $\approx 1.5 \times 10^{-11} \tau^{-1/2}$. This stability is well-explained by SNR of the fringes. Long-term stability is dominated by the 2nd-order Zeeman shift contribution as the clock is not magnetically shielded. The two studies presented in this thesis, namely the μPOP and cold-atom clocks, pave the way towards more miniature and compact frequency standards, respectively. Further improvements of the former would yield a intensity light shift limited clock with $\approx 10^{-13}$ stability at one day. Further version of the latter clock using the cavity as standalone vacuum system would allow for reduced SWaP cold-atom frequency standards.

Publication basic information

Publication date: 2023

DOI: 10.35662/unine-thesis-3067

Authors: Batori, Etienne (Institut de physique)

Editors: Mileti, Gaetano (Institut de physique)

Keywords: Référence de fréquence atomique, Rubidium, double résonance, schéma Ramsey, cellule à vapeur microfabriquée, atomes froids, impression 3d, Atomic frequency standard, double-resonance, Ramsey scheme, microfabricated vapor-cell, cold-atom, additive-manufacturing

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

Publication bibliographic details

Projects

Fundings
