High-resolution spectroscopic studies in glass-blown and micro-fabricated cells for miniature rubidium atomic clocks

Les cellules à vapeur d'atomes alcalin et gaz tampon sont au cœur de presque toutes les horloges atomiques commerciales compactes ou miniatures. Elles contiennent une vapeur d'atomes alcalin dont une des fréquences de transition atomique sert de référence stable à l'oscillateur de l'horloge. Ce travail de recherche porte sur l'étude des phénomènes physiques se déroulant dans ces cellules et plus particulièrement des effets de miniaturisation sur la vapeur d'atomes, en vue de la réalisation d'une horloge miniature.
 Plus de 150 cellules en verre soufflé ont été produites et caractérisées, et plus de 30 cellules micro fabriquées ont été évaluées. Leurs méthodes de fabrications, ainsi que les évaluations spectroscopiques de certains types seulement, orientées vers la miniaturisation, sont présentées. Ces techniques d'évaluation, développées au cours de cette thèse, ont permis d'évaluer des processus innovants de (micro-) fabrication développés à Neuchâtel pour des cellules de référence d'horloges atomiques compactes ou miniatures. Notamment, la caractérisation par spectroscopie du taux de mélange de gaz tampon avec une résolution de ±1% ainsi que la détection de fuites aussi petites que 1.5 x 10⁻¹³ mbar l/s ont permis de valider deux processus de micro-fabrication de cellule : le "classique" anodic-bonding ainsi qu'une technique innovante de scellage à basse température par thermocompression d'indium.
 L'utilisation de certains revêtements anti relaxants permet de s'astreindre du gaz tampon pour la préservation du spin des atomes; quatre types différents ont été testés: Parylene N et C, tetracontane et Octadecyl-Trichloro-Silane (OTS). Alors que les parylenes N et C s'avèrent inadéquats en tant que revêtements anti-relaxants, d'excellentes propriétés anti-relaxantes sont obtenues pour le tetracontane, validant ainsi la méthode ainsi que le système de production développé au LTF pour des cellules en verre soufflé. La fabrication au sein du LTF a permis l'observation du phénomène dit de ripening d'une cellule revêtue de tetracontane par spectroscopie double résonance, dont on présente les résultats. Une explication physique est également donnée. L'expérience acquise avec les cellules en verre soufflé a permis la validation spectroscopique par double résonance d'une cellule micro-fabriquée avec revêtement OTS. Les résultats sont présentés et les propriétés antirelaxantes du revêtement sont démontrées pour un volume de vapeur de rubidium de 4.2 mm³.
 Finalement, une évaluation spectroscopique et métrologique d'un assemblage "résonateur micro-onde-cellule" novateur et micro fabriqué d'un volume inférieur à 0.9 cm³ est présentée. Le volume de la vapeur de rubidium et de gaz tampon est de l'ordre de 50 mm³ seulement. Les déplacements de fréquence systématiques limitant les performances métrologiques sont caractérisés, avec une attention particulière pour le déplacement radiatif. Une analyse détaillée, théorique et expérimentale, de ce dernier, dans les lignes D1 et D2 et pour chaque variante de pompage optique est donnée. Le déplacement de fréquence lié aux variations de puissance micro-onde et le déplacement radiatif en fréquence s'avèrent être les principaux facteurs limitant la stabilité à moyen-long terme à un niveau de quelques 10⁻¹². On démontre également des performances d'instabilité d'horloge relative meilleure que 10⁻¹¹ pour des temps d'intégration de 1-10⁵ s. Une variante d'interrogation supprimant totalement le déplacement radiatif est proposée. Cette dernière permet d'envisager une horloge rubidium extrêmement compact avec des performances hautement compétitives., Buffer-gas alkali vapour cells form the heart of essentially all types of commercial compact or miniaturized atomic clocks. They reliably hold and confine a vapour of alkali atoms, which provides the atomic transition frequency serving as stable reference for the clock oscillator. The desire to bring atomic clock stability to portable applications such as telecommunication and navigation increased the need for more compactness and lower power consumption. This motivated the present thesis work on the cells miniaturization and the novel clocks that could be realized with such cells.
 More than 150 glass blown cells were produced and tested and more than 30 microfabricated cells evaluated. We present the fabrication process for each type of them. We restrict ourselves to the spectroscopic analysis of certain cell types only, which are more oriented towards the miniaturization of an atomic clock. These evaluation techniques, developed in the frame of this thesis, allowed to tests the innovative (micro-) cells fabrication processes elaborated at the LTF and SAMLAB in Neuchâtel. In particular, the buffer gas mixture characterization with a resolution of ±1%, and the leak rate detection with a limit of 1.5 x 10⁻¹³ mbar l/s were achieved. This allowed the validation of two distinct sealing processes: the "classic" anodic bonding, and an innovative low temperature sealing technique using thermocompression of indium.
 As an alternative to the buffer gas, the use of certain types of wall coating also allows the atomic polarization preservation. Four different types have been used: Parylen C and N, Tetracontane and OTS. While the Parylene appears to be inadequate for use with rubidium atoms, excellent antirelaxing properties are obtained with tetracontane and OTS. The successful in-house fabrication of wall coated cells allowed the observation of the ripening process by double resonance spectroscopy. The results are presented and an interpretation is given. A microfabricated OTS wall coated cell was produced at Neuchâtel too, by R. Straessle at SAMLAB. We present its spectroscopic analysis and demonstrate truly antirelaxing properties of the coating in a 4.2 mm³ vapour volume.
 Finally, a spectroscopic and metrologic study of an innovative "cell-microwave resonator" assembly is presented. Both the cell and the resonator are microfabricated. The cell vapour volume is of the order of 50 mm³ only. Systematic shifts limiting the metrologic performances are characterized, with a focus on the light shift. A detailed, theoretical and analytical, analysis is presented in both, the D1 and D2, lines and for various optical pumping schemes. Frequency light shift is found to be one of the main stability limiting factor in the medium to long term regime. The limit is at a level of few 10⁻¹². We demonstrate fractional frequency stability < 10⁻¹¹ from 1 s up to one day of integration time with a resonator physics package volume of less than 0.9 cm³. An alternative interrogation scheme, suppressing completely

the light shift, is discussed to improve the medium to long term performances. This scheme would allow the fabrication of an atomic clock extremely compact with highly competitive stability performances.

Publication basic information

DOI: 10.35662/unine-thesis-2406

Authors: Pellaton, Matthieu (Institut de physique)

Editors: Mileti, Gaetano (Institut de physique)

Keywords: Horloge atomique miniature, double-résonance, cellules à vapeur de rubidium, revêtement anti-relaxant, stabilité de fréquence, métrologie, Miniature atomic clock, double-resonance, rubidium vapour cells, anti-relaxation wall-coating, frequency stability, metrology

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

Publication bibliographic details

Projects

Fundings