

Fabrication and characterization of MEMS alkali vapor cells used in chip-scale atomic clocks and other atomic devices

Les horloges atomiques sont des gardiens de temps pouvant atteindre des performances extrêmes en termes de stabilité et de précision. Sous ce terme, se cache cependant une grande variété de systèmes très différents dont la taille et la complexité peuvent varier considérablement en fonction de leurs applications. On citera par exemple les étalons primaires de fréquence utilisés pour la réalisation de la seconde ou les horloges embarquées dans le système de positionnement par satellite Galileo. Ces dernières années, des efforts importants de miniaturisation et de réduction de la consommation ont donné naissance aux toutes premières horloges atomiques miniatures dont les performances sont potentiellement supérieures à des quartz de haute performance de taille comparable. La fabrication de telles horloges est rendue possible par l'utilisation de techniques de fabrication spécifiques à la microtechnologie et d'un schéma d'interrogation purement optique appelé piégeage cohérent de population.

La partie centrale d'une telle horloge est la cellule micro-fabriquée. Celle-ci consiste en une cavité ayant un accès optique et contenant une vapeur de métal alcalin ainsi qu'un gaz tampon. On notera en outre que leur utilisation n'est pas limitée aux horloges miniatures, mais peut être étendue à d'autres senseurs atomiques tels que les gyroscopes atomiques et les magnétomètres atomiques. La présente thèse de doctorat s'articule autour de deux principaux sujets d'étude concernant les cellules atomiques micro-fabriquées. Premièrement, différents aspects liés aux techniques de microfabrications sont passés en revue et de nouvelles techniques sont étudiées. Dans un second temps, les performances de cellules atomiques fabriquées selon ces techniques sont mesurées afin d'évaluer leur utilisation en micro-horloge ainsi qu'en gyroscope.

La première technologie de micro-fabrication proposée ici est l'application de la thermocompression cuivre-cuivre comme méthode alternative à la soudure anodique pour le scellage hermétique. Cette technique permet de réduire les contaminations internes à la cavité ainsi que d'utiliser des matériaux différents que le silicium et le borosilicate comme constituants de la cellule, allongeant potentiellement leur durée de vie et leur stabilité sur le long-terme. La contamination gazeuse des cellules scellées par thermocompression cuivre-cuivre est en particulier étudiée et une étude préliminaire sur la fabrication de cellules saphir-saphir est présentée.

La deuxième technique de micro-fabrication étudiée est l'application d'un revêtement d'oxyde d'aluminium sur les parois intérieures des cellules. Celle-ci permet de réduire la réaction entre le métal alcalin et les parois des cellules et/ou d'agir comme barrière étanche entre la cavité et le verre et l'extérieur et ainsi d'améliorer leur durée de vie. Cette technologie est en particulier utilisée dans le cas de cellules remplies par décomposition d'azoture de rubidium pour lesquelles la quantité de métal alcalin est limitée. Dans ce cadre, une nouvelle méthode de mesure de la pression partielle d'azote par spectroscopie Raman est présentée et comparée à une mesure similaire réalisée par spectroscopie atomique. Ces résultats sont utilisés dans le cadre d'une étude de durée de vie de cellules remplies par cette méthode et scellées par soudure anodique.

L'utilisation de micropilules rubidium comme source de métal alcalin est ensuite étudiée. Des cellules de ce type sont caractérisées selon plusieurs aspects. En particulier un nouveau mélange de gaz tampon argon-néon développé pour cette méthode de remplissage est examiné et la dépendance de la fréquence atomique à la température et le "point d'inversion" thermique sont étudiés.

La dernière technologie décrite est l'utilisation de micro-disques en or comme point de nucléation du rubidium. En condensant le rubidium hors du chemin optique du laser, ceux-ci permettent d'éviter la migration de gouttelettes de métal alcalin et les instabilités de fréquence d'horloges induites. Des études de stabilité long-terme sont présentées pour mettre en évidence phénomène et prouver l'efficacité de cette technologie.

Finalement, une étude préliminaire sur le temps de relaxation du xénon dans des cellules microfabriquées est présentée en vue de leur utilisation dans des gyroscopes atomiques.

Atomic clocks are timekeeping devices that can achieve extreme performance in terms of stability and accuracy. Behind this name, hides a variety of different systems which size and complexity can be considerably different depending on their applications. The primary frequency standards used for the realization of the second and the clocks mounted on the Galileo satellite positioning system are two well-known examples.

In recent years, considerable efforts lead to miniaturization and reduction of the power consumption of such systems, giving rise to the first chip-scale atomic clocks (CSACs). The performance of these devices is potentially superior to high-performance quartz of comparable size. Their manufacturing is made possible by the use of micro-technology-specific manufacturing processes techniques and the use of a purely optical interrogation scheme called coherent population trapping (CPT). At the heart of a CPT clock is the micro-fabricated (MEMS) cell. It consists of a sealed cavity having an optical access and containing an alkali metal vapor as well as a buffer gas. It should however be noted that the use of such MEMS cells is not limited to CSACs but can be extended to other atomic sensors such as atomic gyroscopes and atomic magnetometers.

The present thesis deals with two main subjects of study concerning micro-manufactured atomic cells. First, various aspects related to cells fabrication are reviewed and new micro-fabrication techniques are studied. In a second step, the performances of atomic cells manufactured with these techniques are measured for their use in CSACs and atomic gyroscopes.

The first micro-fabrication technology proposed here is the application of copper-copper thermocompression as an alternative hermetic sealing technology. This method allows to overcome some of the limitation inherent to the established anodic bonding. By limiting the cavity contamination and allowing the bonding of other alternative materials, it potentially allows to lengthen the cell lifetime and improve the long-term clock frequency stability. In particular a preliminary study on the manufacturing of the sapphire-sapphire cells is presented and a study of the residual gas contamination inside the cavity is realized.

The second technique of micro-fabrication presented here is the application of an aluminum oxide coating on the inner walls of the cells. This coating allows to reduce the reaction between the alkali metal and the cell walls and to improve their lifetime which is particularly interesting in the case of cells filled by

UV-decomposed rubidium azide for which the amount of alkali metal is limited. In this context, a new method for measuring the partial pressure of nitrogen by Raman spectroscopy is presented and compared with a similar measurement carried out by atomic spectroscopy. The results made with this novel technique are used in a lifetime study of cells filled by rubidium azide decomposition and sealed by anodic bonding.
The use of rubidium micro-pills as an alkali metal source is then studied. Cells filled with this method are characterized with respects to their application in CSACs. In particular, a new argon-neon buffer gas mixture developed for this filling method is assessed and the dependence of the atomic frequency to the temperature and its thermal inversion point are studied.
 The latest technology studied here is the use of gold micro-disks as preferential nucleation sites for rubidium. By condensing the rubidium out of the laser light-path, these micro-structures prevent the migration of alkali metal droplets and the induced clock frequency instabilities. Long-term stability studies are therefore presented to highlight this phenomenon and demonstrate the effectiveness of this technology.
 Finally, a preliminary characterization of the Xe relaxation time in MEMS cells is presented in view of their use in atomic gyroscopes.

Publication basic information

Publication date: 2018

DOI: 10.35662/unine-thesis-2653

Authors: Karlen, Sylvain

Editors: Mileti, Gaetano (Institut de physique)

Keywords: Cellules atomiques à vapeur de métal alcalin, rubidium, micro-fabrication, horloges atomiques, piégeage cohérent de population, spectroscopie atomique, spectroscopie Raman, analyse d'image, gaz tampon, gyroscopes atomiques, Alkali metal atomic vapor cells, rubidium, microfabrication, atomic clocks, atomic spectroscopy, Raman spectroscopy, image analysis, buffer gas, MEMS, CSAC, atomic gyroscope

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

Publication bibliographic details

Projects

Fundings
