

Cellule microfabriquée multi-axes pour capteurs atomiques intégrés : procédé de fabrication et démonstration en magnétométrie

L. Péroux¹, A. Dewilde¹, A. Mursa², A. Mazzamurro¹, J. Bonhomme¹, Q. Tanguy²,
E. Klinger², L. Gauthier-Manuel², O. Gaiffe², A. Talbi¹, R. Boudot², P. Pernod¹,
J.-F. Clément¹, V. Maurice¹, N. Passilly²

¹ Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, Univ. Polytechnique Hauts-de-France, UMR 8520 IEMN, Lille

² Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, SUPMICROTECH, Institut FEMTO-ST, Besançon,

nicolas.passilly@femto-st.fr

RESUME

Nous présentons une cellule à vapeur alcaline microfabriquée ayant trois accès optiques orthogonaux. Un procédé niveau wafer (gravure Si/verre et refusion thermique) permet l'intégration de fenêtres latérales de qualité optique sans polissage. La magnétométrie à résonance de champ nul sur Cs/N₂ montre un plancher de sensibilité de 200 fT/√Hz.

MOTS-CLEFS : *Cellules à vapeur alcaline ; accès optiques multiples ; magnétomètre à pompage optique.*

1. INTRODUCTION

Les capteurs atomiques (horloges, magnétomètres, gyroscopes, dispositifs de piégeage, etc.) offrent des performances de mesure remarquables. Leur déploiement à grande échelle demeure toutefois limité par le volume, le coût et la capacité de mise à l'échelle de certains composants critiques, au premier rang desquels figurent les cellules à vapeur alcaline. Historiquement réalisées par soufflage de verre, ces cellules reposent sur un savoir-faire artisanal mais la microfabrication a également permis l'émergence de dispositifs « chip-scale », avec des gains majeurs en intégration [^{1,2}]. La plupart des cellules microfabriquées restent cependant limitées à un unique accès optique, ce qui restreint la mise en œuvre de géométries multi-faisceaux pourtant essentielles dans de nombreuses architectures. En magnétométrie, par exemple, l'introduction d'un faisceau sonde indépendant peut réduire certaines limitations liées au bruit d'amplitude et améliorer la sensibilité. Dans les horloges et les gyroscopes, l'orthogonalité des voies optiques constitue un atout déterminant pour séparer efficacement les fonctions de pompage, d'interrogation et de détection. Plusieurs approches alternatives ont été explorées (cellules soufflées sur wafer, usinage laser 3D, procédés de moulage interne), mais elles imposent souvent des compromis défavorables : distorsions optiques liées à des épaisseurs non uniformes, complexité de fabrication, ou absence de compatibilité avec une réalisation réellement collective. Dans ce contexte, nous proposons une stratégie de fabrication au niveau wafer d'une cellule microfabriquée intégrant trois voies optiques orthogonales, grâce à la présence de fenêtres latérales de qualité optique [³]. La cellule est ensuite validée par une démonstration fonctionnelle en magnétométrie.

2. CONCEPT DE CELLULE MULTI-AXES ET PROCEDE DE FABRICATION

La cellule est réalisée à partir d'un empilement de cinq substrats : trois en verre et deux en silicium. Cette architecture permet d'intégrer un wafer central en verre, microstructuré pour former des fenêtres latérales, tout en conservant la robustesse et l'herméticité d'un assemblage par soudure anodique, technologie largement éprouvée pour les cellules à vapeur alcaline. Les deux wafers de silicium intermédiaires jouent également le rôle de cadre mécanique lors de l'étape de refusion thermique (reflow) appliquée au sandwich Si-verre-Si, ce qui contribue à préserver la géométrie des cavités et la planéité des fenêtres pendant le traitement thermique. Les wafers silicium (épaisseur 500 μm) sont structurés par lithographie et gravure profonde (DRIE) afin de définir les cavités, ainsi que les canaux reliant une cavité « dispenser » à la chambre utile. Le wafer central en verre borosilicaté (Schott BF33, épaisseur 1 mm) est structuré par gravure assistée par laser (*laser-assisted etching*, LAE) : l'écriture laser définit les motifs, puis une attaque chimique (KOH) enlève la matière modifiée. Par rapport à une ablation laser directe, cette approche vise des surfaces plus lisses et des flancs plus verticaux ($\approx 90^\circ$), réduisant l'effort de lissage nécessaire pour atteindre une qualité optique lors du reflow. Une originalité du procédé est l'introduction de cavités additionnelles le long des lignes de découpe afin de former des parois en retrait par rapport à ces lignes. Soumises au même reflow que les cavités principales, ces structures évitent le contact de la lame de découpe avec la zone optique et éliminent ainsi le besoin de polissage post-process tout en autorisant l'utilisation d'une lame plus grossière, ce qui améliore l'efficacité de libération des cellules.

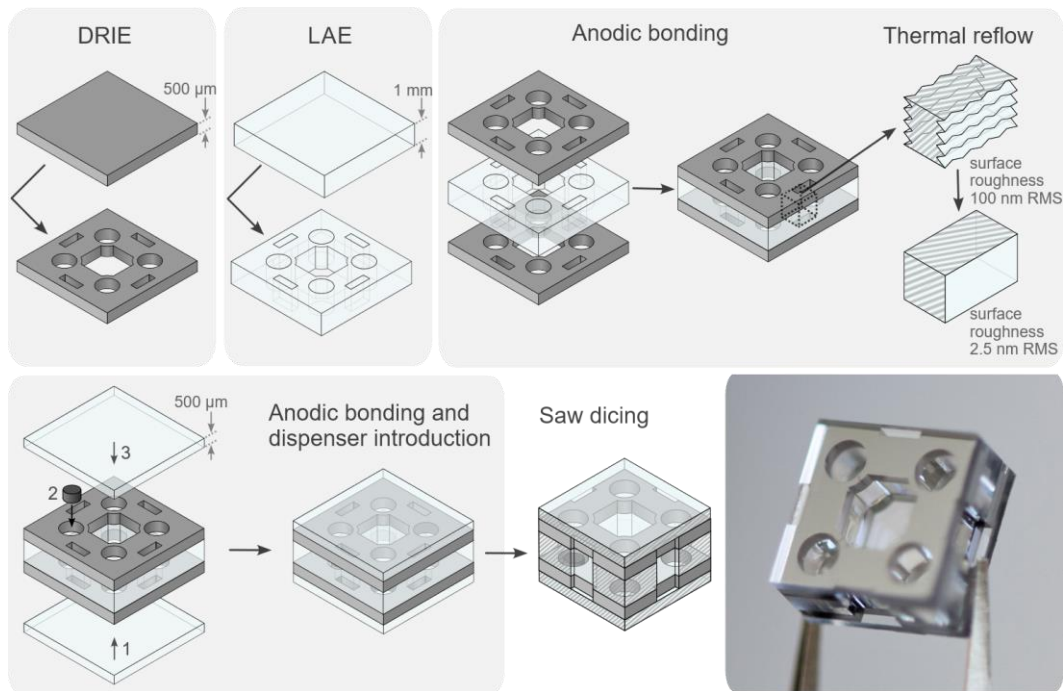


Figure 1 : Organigramme du procédé de microfabrication et photographie d'une cellule microfabriquée.

Une caractérisation optique systématique en fonction de la température de reflow a été menée (transmission, pertes de puissance, distorsion du profil de faisceau et dégradation de l'état de polarisation, via l'ellipticité). Les résultats mettent en évidence un optimum pour le reflow autour de 850 $^\circ\text{C}$, avec une transmission améliorée et des pertes minimisées ($\approx 4,9\%$). À l'inverse, des températures trop basses dégradent la transmission et augmentent la distorsion, tandis que des températures trop élevées introduisent un bowing de la fenêtre. Après reflow du stack Si-verre-Si au niveau wafer, l'ensemble est assemblé avec le couvercle inférieur, chargé avec des dispensers de Cs, puis refermé par soudure anodique du couvercle supérieur sous 760 Torr d'azote à 350 $^\circ\text{C}$. Malgré une petite consommation d'azote lors de l'activation laser du dispenser, la pression estimée via le

déplacement fréquentiel induit, est de 330 Torr à 95 °C. Sur le plan optique, la transmission mesurée à travers la fenêtre principale et les axes latéraux sont assez proches (2 à 3 % de variation), témoignant d'une qualité optique globalement préservée.

3. DEMONSTRATION EN MAGNETOMETRIE : GEOMETRIES MONO-FAISCEAU ET BI-FAISCEAU

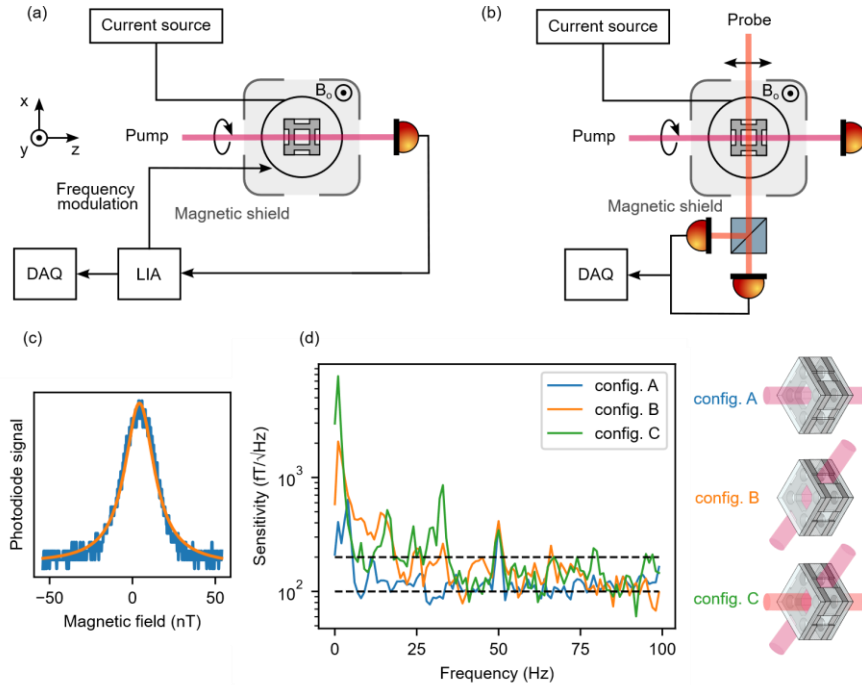


Figure 2 : Montage expérimental du magnétomètre ZFR utilisé pour les mesures suivant 3 configurations.

La cellule est évaluée au moyen d'un magnétomètre à résonance de champ nul (*Zero-Field Resonance*, ZFR), mis en œuvre avec des diodes DFB accordées sur les raies du césium : pompage sur D_1 et interrogation/lecture sur D_2 . La cellule est placée dans un blindage magnétique multicouche ; un champ de test est appliqué au moyen d'un jeu de bobines. Les mesures reposent soit sur une détection en absorption (configuration mono-faisceau), soit sur une détection en rotation de polarisation (configuration bi-faisceau). Trois configurations, correspondant aux différents axes optiques de la cellule, sont comparées : Configuration A: mono-faisceau à travers les fenêtres principales, Configuration B (accès latéral) : géométrie mono-faisceau avec illumination via une fenêtre latérale ; Configuration C (bi-faisceau orthogonal) : pompage via une fenêtre latérale et sonde via les fenêtres principales. La résonance ZFR mesurée (configuration B) est ajustée par un profil lorentzien ; la largeur à mi-hauteur obtenue est de 22 nT à 155 °C (pour une intensité laser de $12 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$). La densité spectrale de bruit du signal magnétométrique met en évidence un plancher de sensibilité atteignant $100 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ pour l'accès principal (configuration A), et $200 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ pour les accès latéraux (configurations B et C).

Ces résultats démontrent une sensibilité meilleure que $200 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$ sur chacun des trois axes optiques, confirmant l'intérêt du concept pour la magnétométrie tri-axes à résolution sub-pT, dans une cellule microfabriquée compatible avec une fabrication collective au niveau wafer.

RÉFÉRENCES

- ¹L-A. Liew, S. Knappe, J. Moreland, H. Robinson, L. Hollberg and J. Kitching, "Microfabricated alkali atom vapor cells" *Appl. Phys. Lett.* vol. 84, pp. 2694–6, 2004.
- ²J. Kitching, "Chip-scale atomic devices" *Appl. Phys. Rev.* vol. 5, p. 031302, 2018.
- ³L. Péroux *et al.*, "Microfabricated multi-axis cell for integrated atomic devices", *J.Phys. Photon.* vol. 8, p. 015022, 2026.