Microsystèmes et microcomposants pour l'instrumentation optique sur puce

Nicolas PASSILLY, Sylwester BARGIEL et Christophe GORECKI
Institut FEMTO-ST, Département MN2S
christophe.gorecki@femto-st.fr

La technologie MEMS (systèmes micro-électro-mécaniques) est aujourd'hui implantée dans différents domaines et conduit à de nombreuses applications commerciales. Grâce à son développement, les composants micro-optiques, optoélectroniques et micromécaniques bénéficient de techniques de micro-fabrication fiables et à faible coût. Dans ce contexte, nos objectifs sont de miniaturiser les instruments optiques de grande taille qui restent aujourd'hui très répandus pour les mesures à l'échelle micrométrique. Ainsi, nous souhaitons réaliser des architectures hybrides d'instrumentation optique grâce à tout le potentiel des microsystèmes. Cette démarche, illustrée par différents projets dans cet article, permet d'atteindre une miniaturisation poussée, d'accéder à la mesure parallèle grâce à la disposition matricielle issue de la fabrication collective et dans certains cas, de donner de nouvelles fonctionnalités.

Les technologies MEMS pour l'instrumentation sur puce

Les technologies MEMS sont apparues dans les années 70 et ont donné naissance, au début des années 90, aux premières applications commerciales principalement avec les accéléromètres et les capteurs de pression. Les MEMS optiques (ou MOEMS) ne sont apparus qu'au milieu des années 90 mais ont connu un essor rapide avec les commutateurs optiques, l'optique adaptative ou les matrices de micro-miroirs. Les systèmes ayant des fonctions optiques sont ainsi devenus un pan important des microsystèmes. À partir de ces composants majoritairement réfléchissants, l'évolution tend aujourd'hui davantage vers l'association de composants réfractifs et diffractifs capables de modifier les propriétés des faisceaux lumineux, en changeant par exemple leur mise en forme ou leur état de polarisation. Notre activité s'articule autour de ces MOEMS et nous essayons d'utiliser les technologies associées pour réaliser des architectures hybrides d'instrumentation optique. Une de nos approches est l'intégration verticale multi-substrat qui consiste, par exemple, à assembler verticalement des substrats de types dif-

férents, comportant des éléments mécaniques, optiques ou électroniques afin de créer des systèmes hétérogènes et complexes sous forme matricielle. Ils peuvent ensuite être utilisés tels quels pour la mesure parallèle ou bien être découpés en sous-ensembles individuels. Les intérêts majeurs sont le fort potentiel de miniaturisation et le peu d'assemblages et d'alignements individuels puisque la majeure partie de la fabrication s'effectue au niveau wafer. Les technologies utilisées sont des technologies de micro-usinage avec différents types de lithographie (optique ou électronique), de gravure (sèche ou humide) majoritairement sur verre et silicium. Les différentes techniques de soudure (anodique, eutectique) sont également requises afin d'intégrer des briques de base hétérogènes.

Cellules pour les horloges atomiques miniatures

Un des exemples d'application des techniques de micro-fabrication est la réalisation d'horloges atomiques miniatures susceptibles de fournir une base de temps avec une précision de l'ordre de 10^{-11} à la journée tout en maintenant une

consommation électrique faible afin qu'elles puissent être embarquées. Ces horloges sont basées sur un phénomène appelé le piégeage cohérent de population (CPT) qui consiste à interroger une vapeur alcaline par un faisceau laser issu d'une diode laser modulée en fréquence. Un photodétecteur permet de détecter la résonance atomique utilisée pour asservir la fréquence de modulation du laser, afin de délivrer un signal stable et précis. Ce principe permet de s'affranchir de la cavité micro-onde de résonance, présente dans la plupart des horloges macroscopiques. Les technologies de micro-fabrication issues des MEMS sont donc utilisées pour réaliser la cellule qui contient la vapeur alcaline (césium dans notre cas). Celle-ci est composée d'un sandwich silicium-verre assemblé par soudure anodique, et où le silicium est usiné par gravure réactive profonde afin de générer la cavité emprisonnant les atomes de césium (figure 1).

Pour garantir une bonne herméticité de la cellule, nous avons développé une technique de remplissage de la vapeur alcaline basée sur un *dispenser*, stable à la température de la soudure anodique, et qui peut être post-activé par un échauffement local par laser une fois la cellule

Figure 1. Microcellule verre-silicium-verre à vapeur alcaline comprenant deux cavités, l'une pour le dispenser qui permet de relâcher le césium après le scellement de la cellule, l'autre pour l'interrogation optique des atomes de césium, reliées par d'étroits canaux.

scellée définitivement. Cette approche garantit une atmosphère interne et une soudure de très bonne qualité. Pour que le signal CPT soit suffisamment élevé (et pour éviter d'avoir à refroidir la cellule), la température nominale d'utilisation est de plusieurs dizaines de °C. À ces températures, l'agitation thermique des atomes de césium est significative, engendrant un élargissement Doppler de la résonance atomique. C'est pourquoi les atomes de césium doivent être dilués dans un gaz tampon (e.g. Ar, Ne) qui, par effet Dicke, ralentit la diffusion des atomes et par conséquent augmente le temps entre deux collisions sur les parois de la cellule. Ce gaz permet, par conséquent, de réduire la largeur Doppler, d'augmenter la durée de vie de la cohérence CPT et de réduire la largeur de la résonance atomique.

Pour remplir la cellule de ce gaz tampon, nous avons développé un procédé de soudure anodique en deux étapes qui permet d'éviter les décharges électriques consécutives à l'ionisation du gaz tampon et empêchant la limitation de la tension applicable. Une pré-soudure est donc réalisée en présence de gaz tampon à une tension inférieure à la tension de claquage, suivie une fois la chambre ventilée d'une seconde soudure à une tension de 900 V pour renforcer la qualité du scellement. Nous avons montré que ces techniques de remplissage de vapeur alcaline et de gaz tampon permettaient la réalisation de cellules dont la durée de vie était de plusieurs années.

Ce projet de réalisation de micro-horloges atomiques est un projet transverse

de FEMTO-ST impliquant, en plus du département MN2S, le département Temps-fréquence pour la métrologie temps-fréquence. Ce projet a reçu en particulier le soutien de la commission européenne (FP7) qui a permis de fédérer un consortium de partenaires européens (pour l'électronique, le laser VCSEL, le packaging) et a conduit récemment à la réalisation d'un démonstrateur MEMS de ces horloges atomiques.

Système interférométrique d'inspection parallèle de MEMS

Dans le cadre d'un autre projet européen appelé SMARTIEHS, nous avons participé à la réalisation d'un système optique d'inspection massivement parallèle pour le contrôle en ligne de la production de MEMS. L'élément central de ce système d'inspection est une matrice d'interféromètres (démonstrateur composé de 5 x 5 canaux), dont le pas est un multiple de l'écart entre deux structures à inspecter, et dont le concept est basé sur l'interchangeabilité des wafers sondes (par exemple : matrice d'interféromètres à basse cohérence pour la topographie, ou matrice d'interféromètre laser pour la caractérisation des paramètres dynamiques). Pour les mesures de topographie, ce dernier est composé d'une matrice d'interféromètres de Mirau micro-usinés, basée sur l'assemblage vertical de deux wafers, l'un muni d'une matrice de microlentilles, de réseaux de diffraction pour la correction des aberrations chromatiques

et sphériques et de micro-miroirs de références, l'autre basé sur un dépôt multicouche diélectrique servant de lame séparatrice (figure 2, schématisant un canal unique). Ce système est également composé d'un bloc d'illumination/détection, comprenant une matrice de diodes électroluminescentes émettant à la longueur d'onde de 470 nm, couplée à un capteur « smart-pixel » qui permet de détecter et démoduler le signal d'interférences.

Le wafer sonde comprend quatre composants micro-optiques différents. La microlentille réfractive est caractérisée par un profil sphérique et une ouverture numérique égale à 0,135 (longueur focale de l'ordre de 9 mm). La correction des aberrations induites par la microlentille est réalisée grâce à un élément diffractif, positionné sur sa face plane, qui présente un profil de phase à symétrie radiale. Ce composant en polymère est répliqué par moulage ultra-violet depuis un master réalisé par lithographie laser à dose variable. Au centre de celui-ci, un micro-miroir de référence en aluminium de dimension $700 \times 700 \mu\text{m}^2$ est préalablement déposé au-dessus d'une couche de silicium amorphe pour limiter la lumière directement réfléchi vers le détecteur (figure 3). Ces couches sont générées par procédé lift-off après le dépôt PECVD du silicium et l'évaporation de la couche d'aluminium sur une couche de résine structurée par photolithographie. En parallèle, la lame séparatrice fonctionnant sous incidence normale est réalisée par pulvérisation de plusieurs paires de couches SiO_2 et SiO_xN_y . Ces deux wafers sont alors assemblés

Figure 2. Vue schématique d'un des interféromètres de Mirau. Le wafer sonde est composé de deux wafers comprenant une microlentille, des corrections d'aberrations diffractives et un micro-miroir, ainsi qu'une lame séparatrice.

Figure 3. Image de l'un des composants diffractifs permettant la correction d'aberrations issues de la microlentille, avec le micro-miroir déposé au centre.

autour d'un wafer de séparation qui permet d'ajuster le chemin optique entre les deux bras de l'interféromètre (figure 4).

La figure 5 présente les images d'un capteur MEMS infrarouge enregistrées par un canal interférométrique du système où les franges d'interférences sont clairement visibles. La dimension des poutres au centre est de 10 microns.

Figure 4. Image du wafer sonde assemblé.

Figure 5. Image d'un capteur infrarouge enregistrée par l'un des interféromètres de Mirau où l'on distingue les franges d'interférences. La surface inspectée par un canal correspond à la taille du micro-miroir (700 x 700 μm^2), la largeur des poutres au centre est de 10 μm .

QUANTRONIX
An Excel Technology Company

Continuum
The High Energy Laser Company™

Innovative Laser Solutions for Science and Industry

Ultrafast Systems
femtosecond oscillators, terawatt systems
179 nm - 22 μm tunable systems

High Energy YAG Systems
to 8 Joules

Kilohertz Solid State Systems
solid state lasers for industrial applications

Nanosecond Tunable Systems
for Science and Research, 205 nm-2550 nm

EXCEL
TECHNOLOGY FRANCE

22 Avenue de la Baltique
91 140 Villebon sur Yvette
Tel: 01 69 74 13 80
Email: ETF@excel-france.com

Serving France for over 25 years

Figure 6. Micro-scanner 3-D micro-usiné intégré verticalement : vue éclatée des briques de base.

Figure 7. Collection d'actionneurs électrostatiques à plaques parallèles portant une microlentille.

Microscope confocal à balayage

Comme pour le projet précédent, l'idée du microscope confocal à balayage intégré sur puce est d'utiliser les techniques collectives de fabrication en vue de miniaturiser le dispositif (pour des inspections *in situ*), de réduire son coût et éventuellement d'accéder à la mesure parallèle d'échantillons qui peuvent être par exemple contenus dans des canaux micro-fluidiques, si ce système est utilisé conjointement avec des matrices de détecteurs et de lasers à semi-conducteurs.

Ce système est basé sur l'intégration verticale de différentes briques de base hétérogènes munies de composants micro-optiques, micromécaniques et opto-

électroniques pour la réalisation d'un scanner micro-optique. Un des défis est donc l'assemblage multi-substrat vertical, qui consiste à empiler différentes briques fonctionnelles et à les connecter entre elles. Le micro-scanner comporte différents actionneurs électrostatiques embarquant, sur leur membrane en silicium, des microlentilles réfractives en verre qui permettent leur

déplacement précis dans le plan (X-Y) et hors du plan (Z) afin de défléchir un faisceau laser et le focaliser suivant les trois dimensions (figure 6). L'actionneur Z est

un actionneur électrostatique en silicium à plaques parallèles (figure 7) dont la course atteint $\pm 35 \mu\text{m}$ à des fréquences de plusieurs centaines de hertz. L'actionneur X-Y est composé de deux cadres imbriqués et actionnés par des peignes interdigités (figure 8). L'isolation électrique entre les deux cadres suspendus permet un contrôle indépendant des mouvements en X et en Y. En mode statique, les déplacements atteignent $\pm 30 \mu\text{m}$ en X et $\pm 40 \mu\text{m}$ en Y. Les fréquences de résonances sont également de plusieurs centaines de hertz.

Afin d'intégrer les microlentilles en verre sur les membranes de ces actionneurs, nous avons recours au moulage à partir de moules en silicium. Ces moules sont générés par différents types de gravure humide, isotrope (HF/HNO_3) ou anisotrope (KOH) en fonction des paramètres optiques recherchés (diamètre, ouverture numérique, distance focale) (figure 9). Les moules obtenus par double gravure anisotrope permettent la fabrication de lentilles de grand diamètre et de faible épaisseur ($\text{ON} < 0,05$, focale de plusieurs millimètres), tandis que les moules gravés isotropiquement produisent des lentilles de petit diamètre et de grande épaisseur dont la forme est proche d'un profil hémisphérique ($\text{ON} < 0,5$, focale de quelques centaines de microns). Pour le moulage proprement dit, un substrat de verre borosilicaté est assemblé au substrat en silicium contenant les moules (par soudure anodique) avant un recuit du verre. Une fois

Figure 8. Table électrostatique X-Y à peigne interdigité avec son emplacement pour recevoir une microlentille. Les encarts montrent les parties isolantes de fixation des cadres ainsi que les peignes interdigités.

le moule rempli, le verre est poli puis une fenêtre est ouverte à travers le substrat en silicium pour libérer la lentille qui reste intégrée sur silicium (*figure 9*).

L'assemblage de ces différents substrats est ensuite réalisé séquentiellement par soudure multi-niveaux. Une des difficultés réside dans la compatibilité des procédés de soudure avec les méthodes d'intégration des composants micro-optiques. Une autre difficulté concerne la réalisation des vias pour les connexions nécessaires à l'actionnement et leur compatibilité avec l'assemblage multi-niveaux, puisque les connexions doivent être accessibles sur la surface de la puce en vue de systèmes de mesure massivement parallèles.

Les performances d'un tel système, dont le volume n'excédera pas 1 cm^3 , sont une résolution comprise entre 1,5 et $2,5 \text{ }\mu\text{m}$ et un volume de balayage de $60 \times 60 \times 60 \text{ }\mu\text{m}^3$.

Le projet est aujourd'hui réalisé en collaboration avec l'institut Fraunhofer ENAS (Allemagne), spécialiste de l'assemblage multi-substrats.

Une voie vers de nouvelles applications

Depuis la fin des années 1990, les MEMS optiques ont lentement évolué à partir de

composants optiquement passifs (actionnement de micro-miroirs) vers des composants optiquement actifs permettant de modifier les propriétés intrinsèques des faisceaux de lumière. Cette évolution initiée par l'optique adaptative s'oriente aujourd'hui vers des systèmes dans lesquels l'association d'actionneurs et de divers composants micro-optiques (réfractifs, diffractifs) permet de construire des fonctions optiques complexes et dynamiques. Cette évolution est rendue possible par le développement récent des technologies micro-optiques et d'intégration hétérogène. Les technologies MEMS

sont donc aujourd'hui propices à la réalisation d'instruments optiques sur puce complets. Leurs avantages sont clairement le très fort potentiel de miniaturisation, la réduction de la consommation énergétique et de leur coût ainsi que l'accès à la mesure massivement parallèle. En surmontant l'obstacle de l'intégration de tels systèmes complexes, de nouvelles applications pour la médecine (systèmes portables à haute résolution, micro-endoscopes), ou pour les télécommunications deviennent réalisables.

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

- De 200 à 18000 nm
- Barre-bande
- Barre-AMU
- Barre-CLK
- Large bande
- Densité neutre
- Densité en klick

Réseaux Holographiques

- De 150 à 2000 nm
- Compression d'impulsion
- 161P.com
- 2 accordables Koppel
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock

94: (parD franc0K): k:DKuk11kpecl@n.com + 3: D-44 158 770000
 Zweden (Aardqua Lark): k:DKuk11kpecl@n.com + 3: D-46 86 882800
 97: k:DKuk11kpecl@n.com + 3: D-1 85 333 11191

www.spectrogon.com