

# Microsystèmes et microcomposants pour l'instrumentation optique sur puce

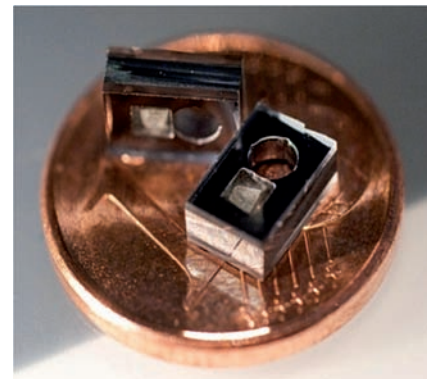
Nicolas PASSILLY, Sylwester BARGIEL et Christophe GORECKI  
Institut FEMTO-ST, Département MN2S  
[christophe.gorecki@femto-st.fr](mailto:christophe.gorecki@femto-st.fr)

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 ont bénéficié de techniques de micro-fabrication fiables et à faible coût. Dans ce contexte, nos objectifs sont de réaliser 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 à l'échelle du potentiel des microsystèmes. Cette démarche est illustrée par différents projets dans cet article, permettant 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 découvrir 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 peu-



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

## 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 une forme 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  $700 \times 700 \text{ m}^2$  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  $\text{SiO}_2$  et  $\text{SiQN}_y$ . Ces deux wafers sont alors assemblés

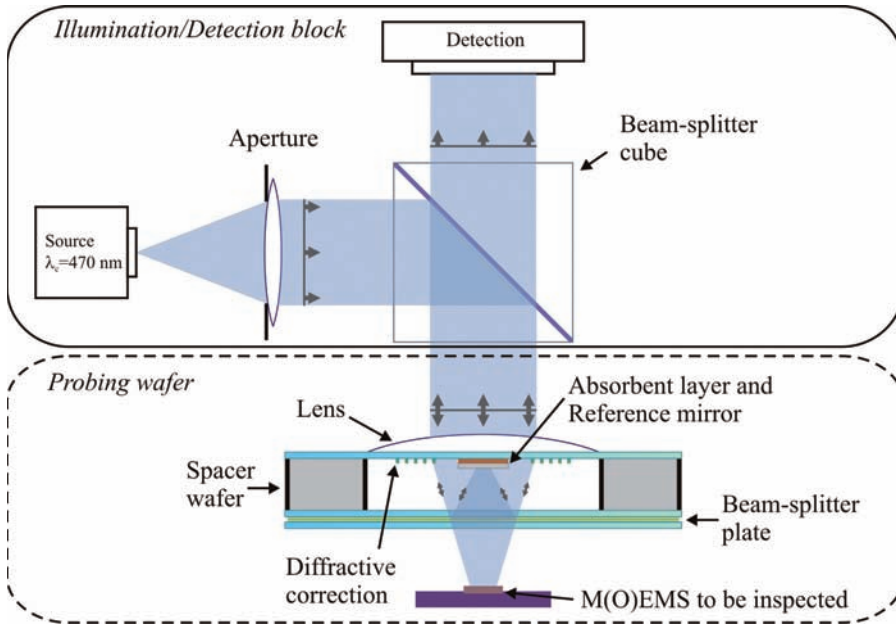


Figure 2. Vue schématique d'un des interféromètres de Mirau. Le wafer sonde est composé de deux wafers comprenant une microlentille, des corrections d'aberrations diffractives et un micro-miroir, ainsi qu'une lame séparatrice.

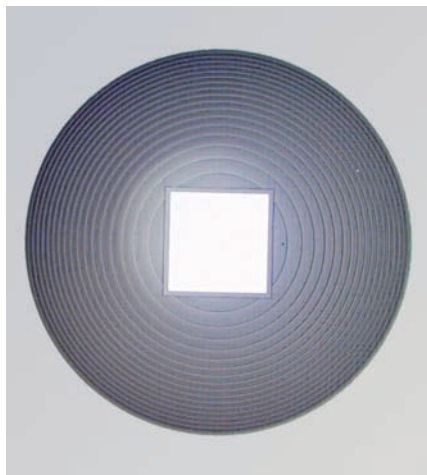


Figure 3. Image de l'un des composants diffractifs permettant la correction d'aberrations issues de la microlentille, avec le micro-miroir déposé au centre.

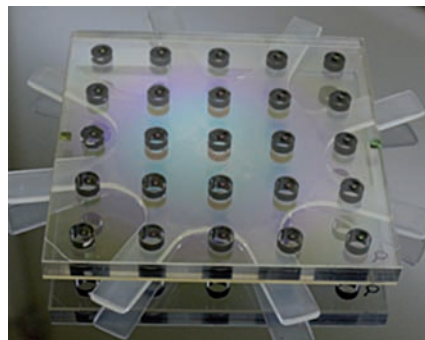


Figure 4. Image du wafer sonde assemblé.

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 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), la largeur des poutres au centre est de 10 μm.

**QUANTRONIX**  
An Excel Technology Company

**Continuum**  
The High Energy Laser Company™

**Ultrafast Systems**

**High Energy YAG**

**KHz Solid State**

**Tunable Systems**

**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

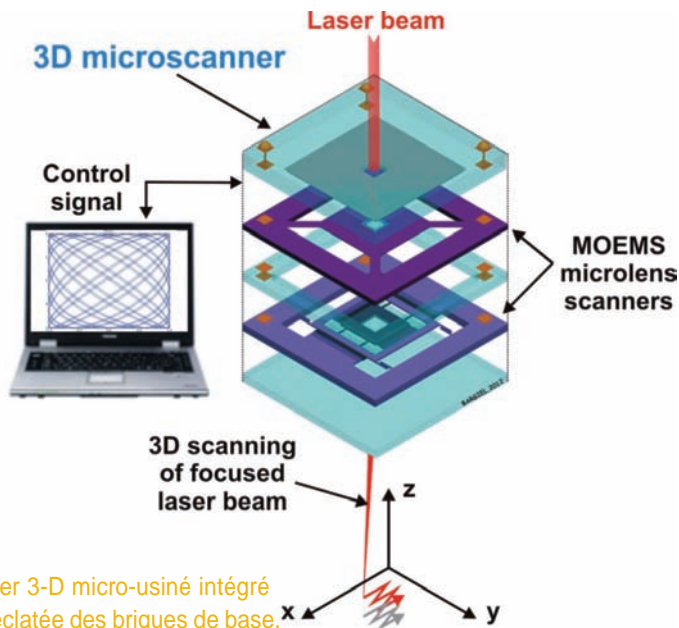


Figure 6. Micro-scanner 3-D micro-usiné intégré verticalement : vue éclatée des briques de base.

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<sub>3</sub>) 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

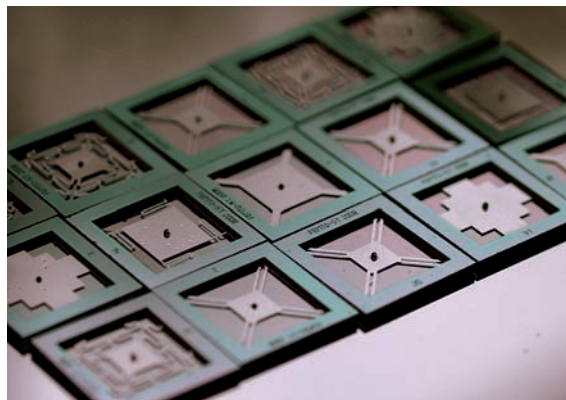


Figure 7. Collection d'actionneurs électrostatiques à déplacement précis dans le plan (X-Y) et à plaques parallèles portant une microlentille. L'actionneur Z est hors du plan (Z) afin de défléchir un faisceau laser et le focaliser suivant les trois dimensions (figure 6). L'actionneur Z est

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

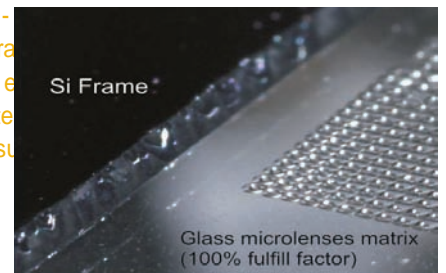
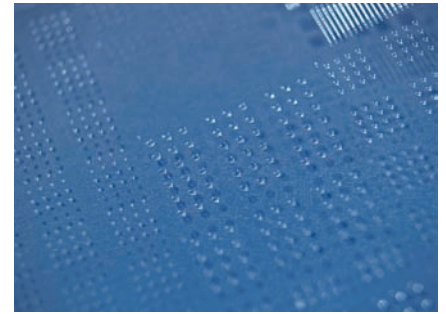
## Microscope confocal à balayage

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-

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.





**Figure 9.** Génération de microlentilles par moulage. À gauche : moule en silicium réalisé par gravure humide isotrope, au centre : microlentilles en polymère répliquées à partir des moules, à droite : matrice de microlentilles en verre intégrées sur silicium.

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.

## Une voie vers de nouvelles applications

Depuis la fin des années 1990, les MEMS technologies micro-optiques et d'intégration optiques ont lentement évolué à partir de

## SPECTROGON

state of the art products

### Filtres Interférentiels



- De 200 à 1200 nm
- 60000 - 100000
- 60000 - 100000
- 60000 - 100000
- Large bande
- Demande nouvelle
- Disponible en stock

### Réseaux Holographiques



- De 150 à 2000 nm
- Compression d'impulsion
- 100000
- 200000
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock

UK (parl français): [rs@uk.spectrogon.com](mailto:rs@uk.spectrogon.com) • T +44 1592770000  
 Sweden (headquarters): [rs@se.spectrogon.com](mailto:rs@se.spectrogon.com) • T +46 86382800  
 US: [rs@us.spectrogon.com](mailto:rs@us.spectrogon.com) • T +1 9733311191

[www.spectrogon.com](http://www.spectrogon.com)