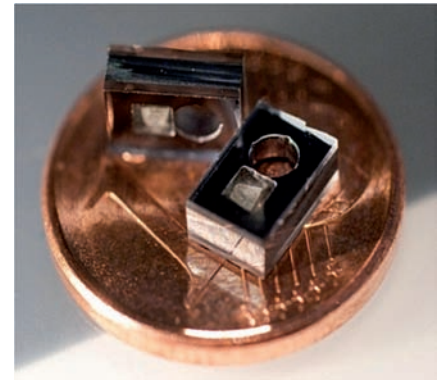


Nicolas PASSILLY, Sylwester BARGIEL et Christophe GORECKI  
Institut FEMTO-ST, Département MN2S  
[christophe.gorecki@femto-st.fr](mailto:christophe.gorecki@femto-st.fr)

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



**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 surface 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 x 700 nm<sup>2</sup> 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<sub>2</sub> et Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Ces deux wafers sont alors assemblés

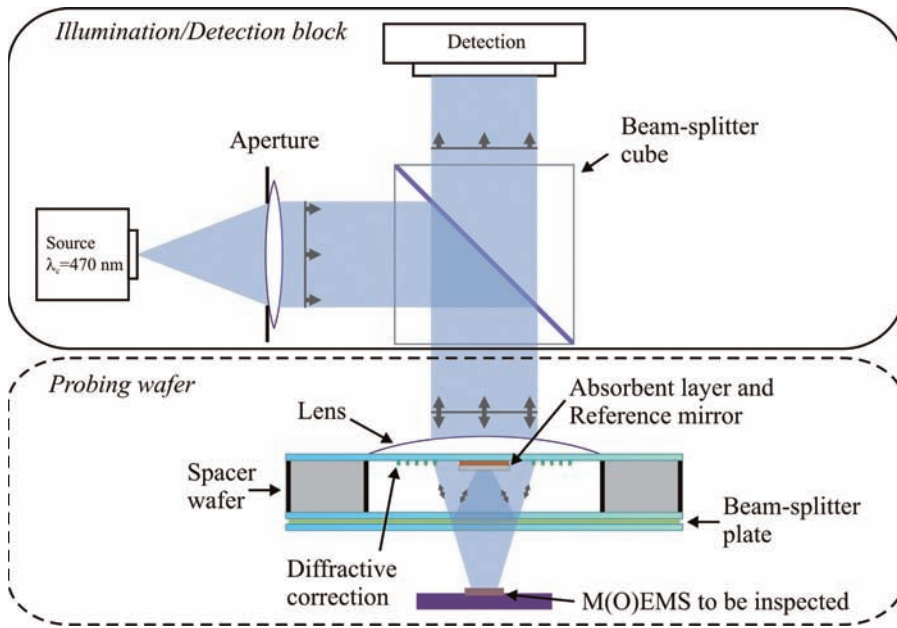


Figure 2. Vue schématique d'un des interféromètres de Mirau. Le wafer sonde est composé de deux wafers comprenant une microlentille, des corrections d'aberrations diffractives et un micro-miroir, ainsi qu'une lame séparatrice.

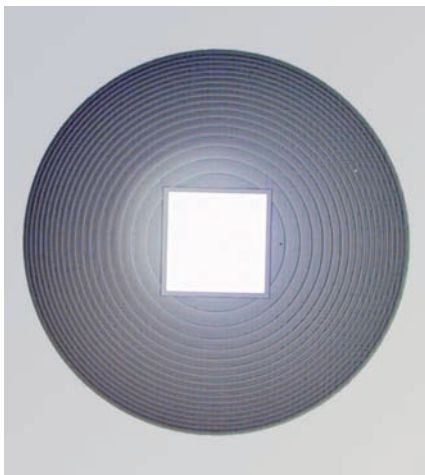


Figure 3. Image de l'un des composants diffractifs permettant la correction d'aberrations issues de la microlentille, avec le micro-miroir déposé au centre.

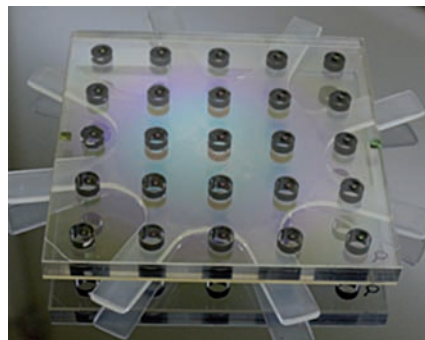


Figure 4. Image du wafer sonde assemblé.

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

**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

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*

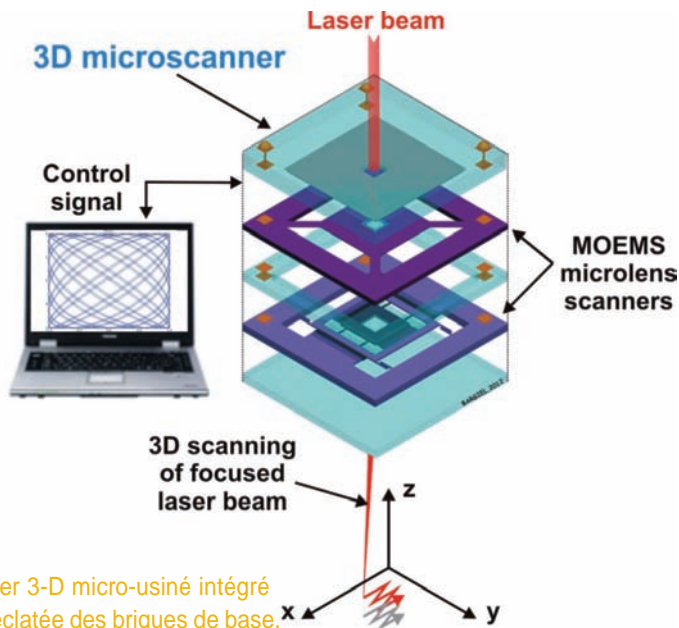


Figure 6. Micro-scanner 3-D micro-usiné intégré verticalement : vue éclatée des briques de base.

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

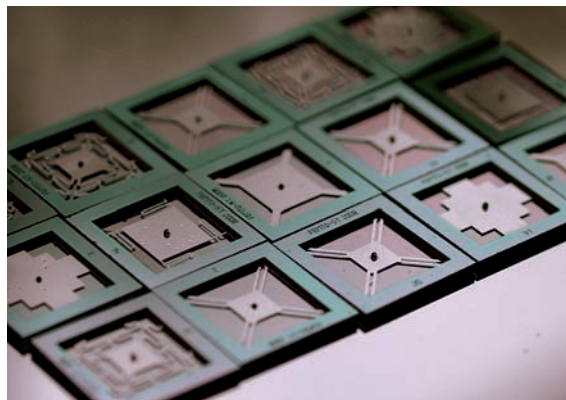


Figure 7. Collection d'actionneurs électrostatiques à déplacement précis dans le plan (X-Y) et à plaques parallèles portant une microlentille.

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

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

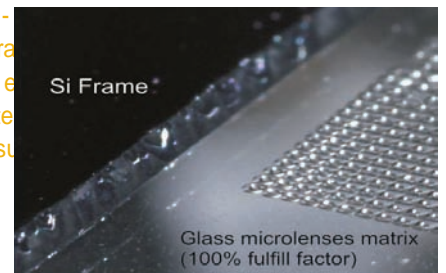
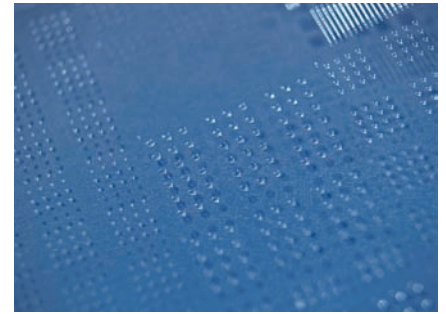
## Microscope confocal à balayage

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
- Double couche
- Disponible en stock

### Réseaux Holographiques



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

UK (parD français): [rs@uk.spectrogon.com](mailto:rs@uk.spectrogon.com) • T: +44 1502770000  
 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)