

# Applications de la micro-optique

ALAIN TROUILLET

# Table des matières

<b>I. Présentation</b>	<b>3</b>
<b>II. Cours</b>	<b>4</b>
1. Historique des applications.....	<b>5</b>
1.1. Quelques repères.....	<b>5</b>
2. Classification des microsystèmes optiques.....	<b>6</b>
2.1. Les sources.....	<b>8</b>
2.2. Les guides optiques.....	<b>11</b>
2.3. Les dispositifs en transmission.....	<b>21</b>
2.4. L'optique réflective.....	<b>23</b>
2.5. L'optique diffractive.....	<b>25</b>
2.6. L'optique interférentielle.....	<b>29</b>
2.7. Les détecteurs.....	<b>33</b>
2.8. Les applications principales.....	<b>33</b>
3. Brèves études de cas.....	<b>36</b>
3.1. Les micro-miroirs digitaux.....	<b>36</b>
3.2. Les matrices de micro-miroirs en couches minces.....	<b>37</b>
3.3. Le commutateur de lumière à réseau (GLV : Grating Light Valve).....	<b>39</b>
3.4. Le polychromateur.....	<b>40</b>
3.5. Bolomètres IR sans refroidissement.....	<b>41</b>
3.6. Les microsystèmes pour l'optique intégrée.....	<b>42</b>
3.7. Les cavités laser Fabry-Pérot accordables.....	<b>43</b>
3.8. Dispositifs optiques à contraintes accordables.....	<b>43</b>
4. Quels matériaux pour quelles applications ?.....	<b>46</b>
4.1. Rappel.....	<b>46</b>
4.2. L'exemple des systèmes de projection à DMD.....	<b>46</b>
4.3. Autres Exemples.....	<b>47</b>
4.4. Perspectives.....	<b>48</b>
<b>Signification des abréviations</b>	<b>49</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>50</b>
<b>Webographie</b>	<b>51</b>

# I.Présentation

## *Module :*

---

Micro-Optique

## *Auteur(s) :*

---

Alain TROUILLET - Université Jean Monnet Saint-Étienne

## *Résumé :*

---

Ce cours consiste en une présentation descriptive des applications principales des microsystèmes optiques classées à la fois en fonction des propriétés optiques mises en jeu et des domaines d'application envisagés.

## *Mots-clés :*

---

Microsystèmes optiques, Micro-optique, MOEMS, MEMS

## *Pré-requis :*

---

Cours d'optique de niveau Licence et Master 1ère année

## *Objectif(s) pédagogique(s) :*

---

Connaître les principales applications des microsystèmes optiques à ce jour. Les applications seront présentées et classées en fonction des caractéristiques mises en jeu de façon à mettre en évidence les propriétés communes exploitées et les nouvelles fonctionnalités optiques permises par ces dispositifs. Les aspects matériaux et relatifs à la fabrication des microsystèmes seront plus particulièrement développés.

## *Plan du cours :*

---

- Introduction
- Historique des applications
- Classification des microsystèmes optiques
- Brèves études de cas
- Quels matériaux pour quelles applications ?

## *Conception & production :*

---

PRN - Le Mans Université

## *Licence :*

---

Licence GNU<sup>1</sup>

1 - <http://www.gnu.org/licenses/fdl.txt>

## II. Cours

Le domaine de la micro-optique et des microsystèmes optiques (MOEMS★ ou Optical-MEMS [MEMS : fabrication, design and applications]) a fait l'objet d'une croissance rapide au cours de la dernière décennie et plus particulièrement dans la dernière partie des années 1990. Les premières applications s'appuyaient fortement sur les technologies MEMS★ [MEMS for optical functionality]. On peut les classer à peu près dans l'ordre chronologique de leur apparition : systèmes de projection, composants pour les communications par fibre optique (sources, switchs, jonctions, routers, etc... ) , capteurs optiques et imagerie.

Les fonctionnalités optiques permises par les microsystèmes s'étendent de l'émission de lumière à la détection en passant par l'amplification, la commutation, la modulation spatiale et le routage, aussi bien que par le traitement de base du signal optique. Les performances des microsystèmes optiques [Les microsystèmes] ont progressé à la fois avec les avancées dans le domaine des matériaux et avec le développement d'une approche systèmes pour leur conception.

La forte demande du marché pour ces objets, bien que instable, couplée avec les challenges intellectuels posés a conduit à une extension des activités de recherche et de développement aussi bien au niveau académique que industriel. En phase avec ces efforts, les gouvernements bientôt suivis par des investisseurs privés ont apportés les financements nécessaires à ces développements. De nouveaux concepts et de nouveaux systèmes en ont résulté et les premières réalisations sont maintenant sur le marché depuis plusieurs années, tout particulièrement sur celui des systèmes de projection.

Un des aspects de l'utilisation des microsystèmes en optique est la miniaturisation. C'est un facteur important dans de nombreux cas, du point de vue à la fois de l'encombrement et du coût des matériaux. Cependant la miniaturisation à elle-seule ne peut pas suffire pour assurer le succès commercial des microsystèmes optiques dans la plupart des cas. Les facteurs de succès décisifs des microsystèmes optiques sont plutôt à rechercher parmi les nouvelles fonctions optiques rendues possibles par l'utilisation de ces technologies. Trois facteurs de succès fondamentaux des microsystèmes optiques peuvent être dégagés :

- la possibilité de réaliser des matrices de micro-dispositifs sur une large échelle;
- la capacité de reconfigurer les propriétés optiques, spatialement et temporellement, en utilisant des micro-actionnements ou des micro-déformations localisés;
- le contrôle nanométrique de la précision du positionnement et des alignements pour des dispositifs à l'échelle micrométrique, plus connu sous le nom de « nano-positionning ».

Ce cours fait suite au cours « Introduction à la micro-optique » dans lequel les concepts de base et les principales technologies de fabrication ont été introduits. L'objectif, maintenant, est de lister un certain nombre d'applications des microsystèmes optiques en tentant de mettre l'accent sur l'émergence de ces nouvelles fonctionnalités et sur leur impact sur les produits optiques.

Ce cours portera donc sur un historique des microsystèmes optiques allant de la recherche sur la physique du solide dans les années 1970 et 1980 jusqu'aux applications actuelles.

Il présentera ensuite une classification des microsystèmes optiques.

Puis on décrira avec un certain nombre de détails des cas particuliers choisis de produits à base de microsystèmes en insistant plus particulièrement sur l'intérêt apporté par les trois facteurs cités plus haut.

Enfin, la dernière partie sera consacrée à une discussion sur les problèmes relatifs aux matériaux pour l'élaboration de ces structures et les challenges à relever pour la recherche pour les réaliser.

# 1. Historique des applications

## 1.1. Quelques repères

### a) La première démonstration d'un miroir à torsion miniature ( $\sim 2 \times 2$ mm)

Elle a été réalisée par Kurt Petersen chez IBM en 1982.

Si on prend cette réalisation comme base de référence, Petersen avait prévu que « ...les microsystèmes mécaniques en silicium pouvait éventuellement trouver une application pratique pour les écrans d'affichage (plus particulièrement si on arrivait à intégrer la circuiterie silicium de commande sur la même puce en adressant électroniquement de manière matricielle le réseau de miroirs bi-dimensionnel) ». Cette affirmation s'est avérée véritablement prophétique vu le succès des microsystèmes pour réaliser des écrans tels que le « DMD, Digital Micromirror Device » de Texas Instruments [-].

### Rappel

cf étude de cas du cours Introduction à la micro-optique.

On s'aperçoit vite que les écrans utilisant des réseaux de micro-miroirs sont le plus ancien champ d'applications des microsystèmes optiques. La tendance a cependant conduit à bien d'autres applications pour les réseaux de micro-miroirs comme nous le verrons ci-après.

L'idée de base des systèmes à micro-miroirs digitaux consiste à produire un réseau de micro-miroirs bistables pour intercepter le rayon lumineux de telle sorte qu'une des positions d'un micro-miroir dirige la lumière sur un écran alors que l'autre position la dirige vers un bloc absorbant. Pour cela, chaque micro-miroir actionne et module un pixel différent. En réalisant un tramage sur le miroir, une échelle de gris peut aussi être réalisée. Les écrans couleur peuvent être obtenus par des méthodes standard telles qu'une roue colorée (le plus compact et le moins cher donc le plus courant) ou des réseaux de miroirs triples pour les trois couleurs fondamentales (rouge-vert-bleu) combinés avec des optiques dichroïques et projetant sur le même écran. Cette technologie fait l'objet d'un développement plus long par la suite.

### b) Un concept alternatif d'écran à micro-miroirs

Ce concept a été proposé en 1994 par le groupe conduit par David M. Bloom chez Stanford. La méthode de modulation, par opposition aux micro-miroirs, consistait en l'utilisation de la diffraction de la lumière par des réseaux miniatures, un par pixel sur l'écran. Ce concept a été désigné sous le nom de « GLV Grating Light Valve » par ses inventeurs. La structure et la micromécanique des GLV font l'objet de plus de développement au paragraphe 4. Dans la plupart des cas de mise en œuvre de la technologie GLV, la lumière est émise au travers un système de Schlieren qui bloque la diffraction à l'ordre 0 et laisse passer la diffraction aux ordres  $\pm 1$ . Il ressort que lorsque le réseau est inactif il n'y a pas de lumière transmise sur l'écran alors que lors de l'activation du réseau le pixel correspondant sur l'écran est illuminé par la figure d'interférences formée par les ordres  $-1$  et  $+1$ . La différence essentielle entre le GLV et les écrans à base de micro-miroirs est que les actionneurs GLV donnent des faisceaux longs ( $\sim 0,5\text{mm}$ ), minces ( $\sim$  quelques microns) alternant entre deux positions verticales et qui, de plus, peuvent être actionnés plus rapidement (dixième de *Mhz* contre quelques *kHz*). Pour cela, le GLV a typiquement besoin d'être une matrice de pixels intégralement 2D, mais en revanche il est mise en œuvre sur une ligne unique qui est lue rapidement dans la direction verticale pour produire l'effet complet. Pour la même raison la ligne GLV peut avoir beaucoup plus de pixels que la dimension linéaire ne l'autorise aux écrans à micro-miroirs de la même génération. Il y a cependant un problème : puisque la modulation de la lumière est basée sur la diffraction, l'efficacité est réduite et il est nécessaire d'avoir recours à des sources laser de haute puissance pour obtenir suffisamment de brillance. D'où le GLV est plus naturellement

réservé à des marchés de projection haute technologie qui peuvent supporter le coût et l'encombrement des sources laser en échange d'une excellente résolution de milliers de pixels par dimension sur une grande surface de projection (par exemple pour du cinéma digital). A l'inverse, les écrans à micro-miroirs ont remporté le succès sur le marché de masse des ordinateurs et des vidéoprojecteurs où la résolution XGA est suffisante et le prix, l'encombrement et le poids sont des facteurs déterminants.

### Remarque

La comparaison des DMD et des GLV est intéressante parce qu'elle montre comment l'imbrication entre les principes optiques (réflexion vs diffraction) d'une part et les éléments mobiles (lames rectangulaires pivotantes vs faisceaux fins se déplaçant verticalement) d'autre part peuvent influencer les autres paramètres extrinsèques du système (choix de la source de lumière, résolution, encombrement, prix) et radicalement changer le résultat de fabrication d'un microsystème.

### Remarque

Il est aussi intéressant de noter que Texas Instruments considère maintenant (depuis 2004) que le marché des imprimantes laser est une alternative possible pour ses produits DMD.

#### c) " Silicon micro-optical bench "

Une extension naturelle du thème des micro-miroirs est celui maintenant bien connu sous le nom de « **silicon micro-optical bench** » (banc micro-optique en silicium) pour lequel des dispositifs optiques sont miniaturisés à la surface d'une plaquette de silicium alors qu'avec des optiques traditionnelles ils devraient utiliser plusieurs  $cm^2$  sur une table optique. Plusieurs systèmes ingénieux ont été mis au point pour traiter la lumière à cette petite échelle. Ils incluent des micro-miroirs automatiques (« pop-up »), des micro-lentilles de diffraction (lames avec une zone de Fresnel) et des sources intégrées. De tels systèmes présentent un fort potentiel pour un grand nombre d'applications en traitement optique du signal et pour réaliser des capteurs.

\* \*  
\*

Dans tous les cas, l'application majeure qui a émergé de ces efforts de recherche concerne les réseaux optiques parce qu'ils se trouvaient dans le champs pour lequel le besoin de miniaturisation était le plus pressant. Tout d'abord, le moteur de la technologie a été le désir de réduire la taille des routeurs pour les applications DWDM (dense wavelength division multiplexing) par un facteur d'échelle analogue à celui qui permet de passer de la taille d'un réfrigérateur à celle d'une boîte à lettre. Ce besoin n'était pas important uniquement parce que de tels noeuds DWDM devaient pouvoir être intégrer des spots centraux de distribution urbaine mais aussi parce qu'une croissance exponentielle de la demande en termes de capacités de production était attendue.

## 2. Classification des microsystèmes optiques

Walker et Nagel ont étudié et listé les différentes microtechnologies pour les applications optiques et ils ont proposé de les classer selon le type de micro-optique utilisée et les fonctions

optiques réalisées telles que : sources, détecteurs, optique en espace libre, optique guidée, optique en transmission, optique réfléchive, optique diffractive et optique interférentielle (cf tableau ci-dessous).

Principes	Microsystèmes
Optique réfléchive	Matrices de micro-miroirs pour écrans Matrices de pistons à correction de phase
Optique diffractive	Lames de Fresnel Réseaux accordables
Optique en espace libre	Commutateurs optiques 2D Commutateurs optiques 3D
Optique guidée	Guides plans Alignement de fibres optiques
Optique interférométrique	Lasers à cavité externe Fabry-Pérot accordable
Détecteurs	Bolomètres Microspectromètres
Transmission	Choppers et micro-interrupteurs optiques
Optique adaptative	Miroirs déformables pour la correction des aberrations
Sources	VCSEL Lasers à cavité externe

Les micro-miroirs sont utilisés pour diriger un faisceau optique vers un guide d'onde, dans ou à l'extérieur d'une fibre optique et pour rediriger la lumière. De nombreux systèmes fonctionnant en mode réfléchif ont été développés directement sur silicium, sur des surfaces métalliques ou dans des systèmes multicouches d'indices de réfractifs différents. Par exemple le VCSEL (vertical cavity surface emitting laser) est typiquement un microsystème construit sur un empilement multiple de couches d'indices différents pour obtenir de très hauts coefficients de réflexion.

Les matrices de micro-miroirs sont l'application la plus répandue des microsystèmes optiques et sont utilisées principalement pour les systèmes de projection et pour la commutation optique en espace libre.

L'optique diffractive permet de réaliser des micro-lentilles planaires, des lentilles de Fresnel et des réseaux.

Dans les systèmes précédents, la lumière se propage dans l'espace libre avant d'atteindre l'actionneur qui la dévie ou la diffracte. L'autre alternative pour manipuler la lumière consiste à la confiner dans un guide d'onde optique. Il est alors impossible d'interagir directement avec elle mais on peut toujours modifier sa propagation en positionnant un microsystème actionneur suffisamment près du guide pour qu'il y ait couplage possible par l'onde évanescente. Typiquement le couplage par l'onde évanescente se traduit par un retard de phase qui en retour peut être utilisé pour réaliser de la commutation optique, etc ...

La recherche sur les microsystèmes optiques a mis en évidence un très grand nombre de nouveaux dispositifs. Un certain nombre est devenu des succès commerciaux mais beaucoup d'autres pas encore. On a pu constater que la miniaturisation seule n'est pas suffisante pour créer de nouveaux marchés ou pour devenir plus compétitif. Les microsystèmes optiques qui

ont connu les plus grands succès commerciaux sont ceux qui combine au moins deux des trois facteurs déjà cités : possibilité des réaliser des matrices, capacité de reconfigurer les propriétés optiques et contrôle nanométrique de la précision du positionnement.

## 2.1. Les sources

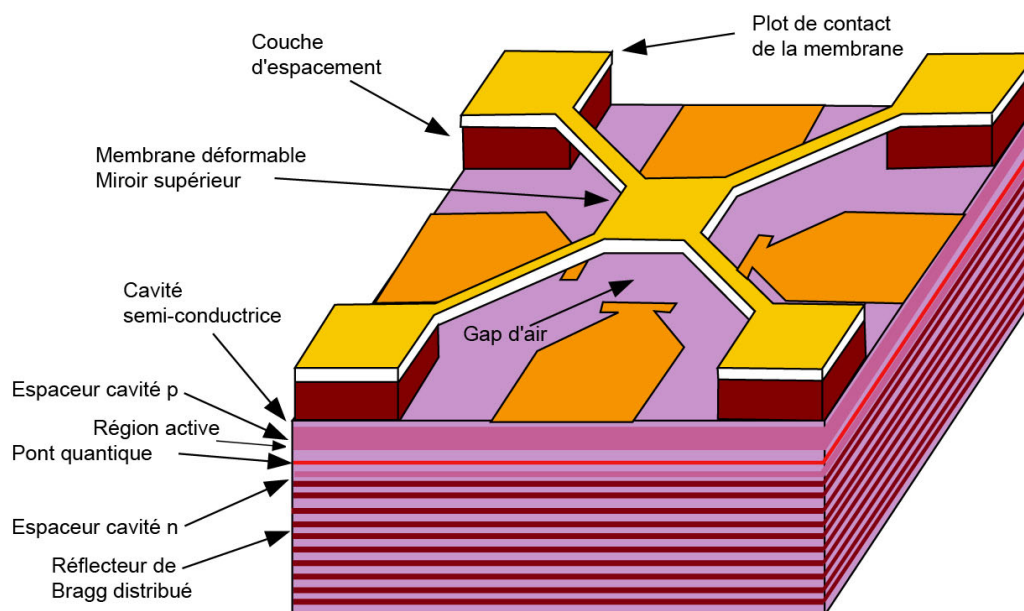
On trouve dans cette catégorie :

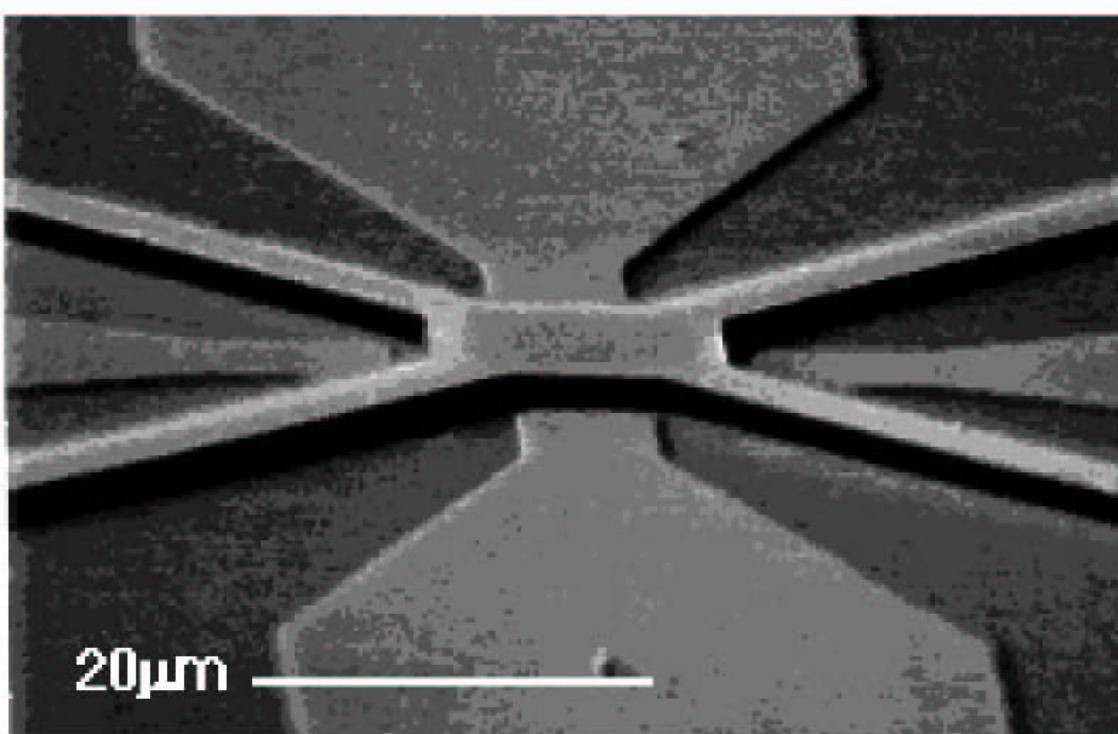
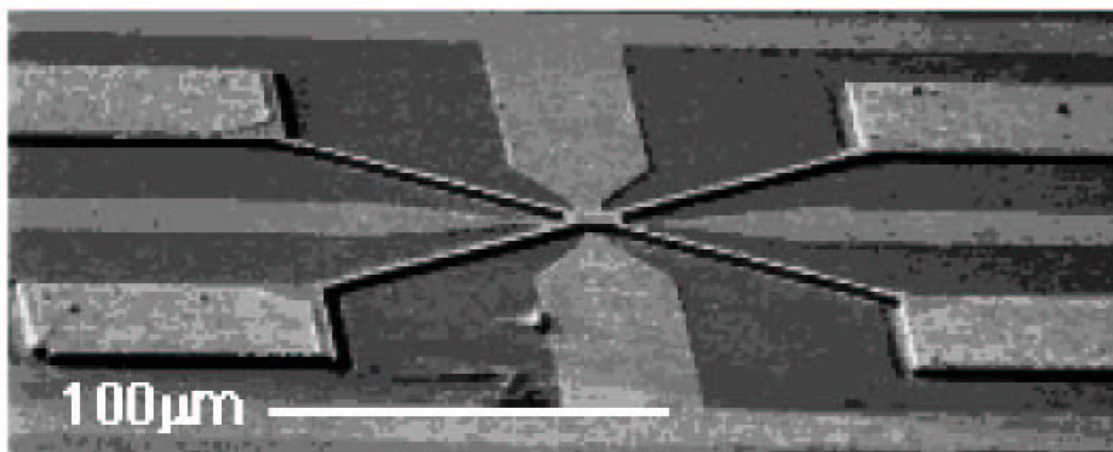
- des sources thermiques
- des dispositifs à semi conducteurs
  - LEDs
  - Diodes laser à émission classique par la tranche ou verticale (VCSEL)

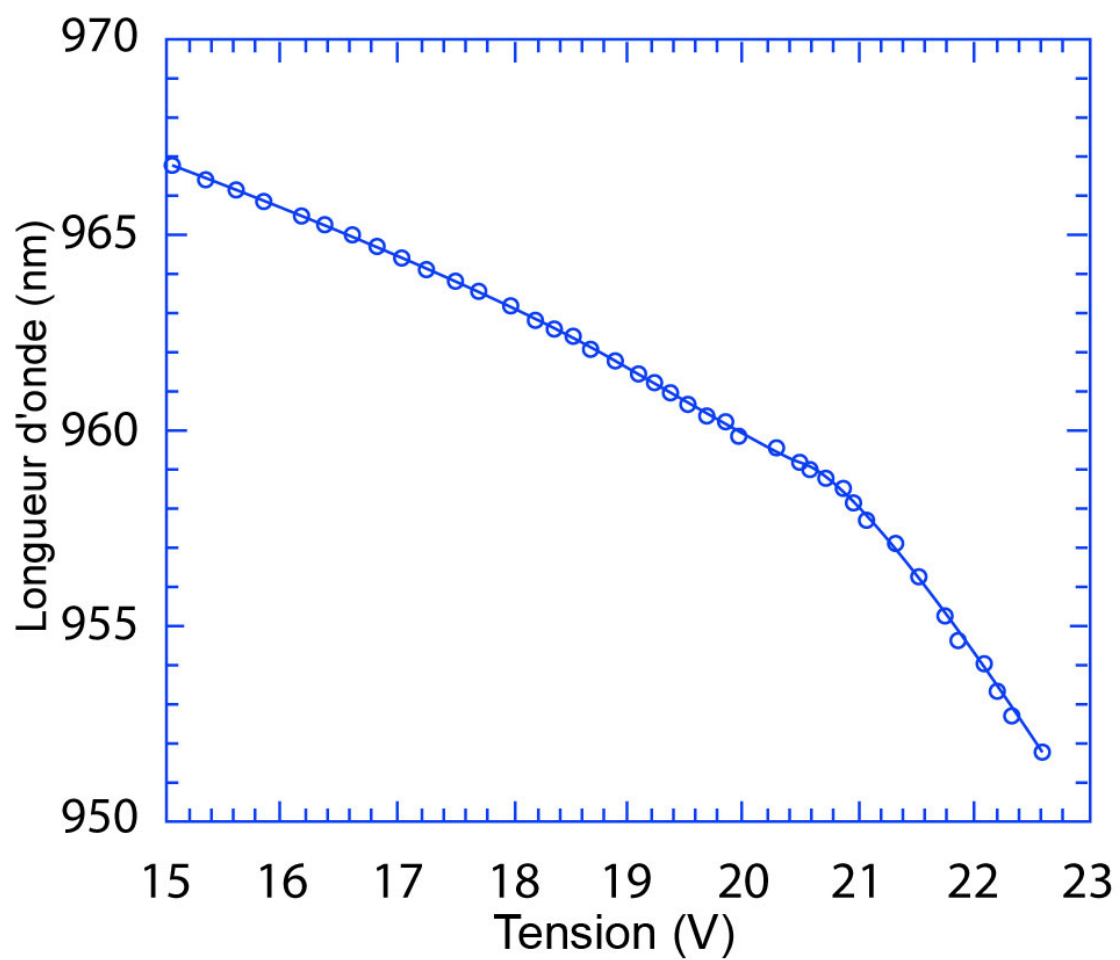
On peut noter que ces dispositifs bien qu'ils utilisent les techniques de microfabrication des microsystèmes ne sont pas toujours considérés comme tels. En revanche, les possibilités d'intégration font qu'ils font facilement partie de microsystèmes plus complexes.

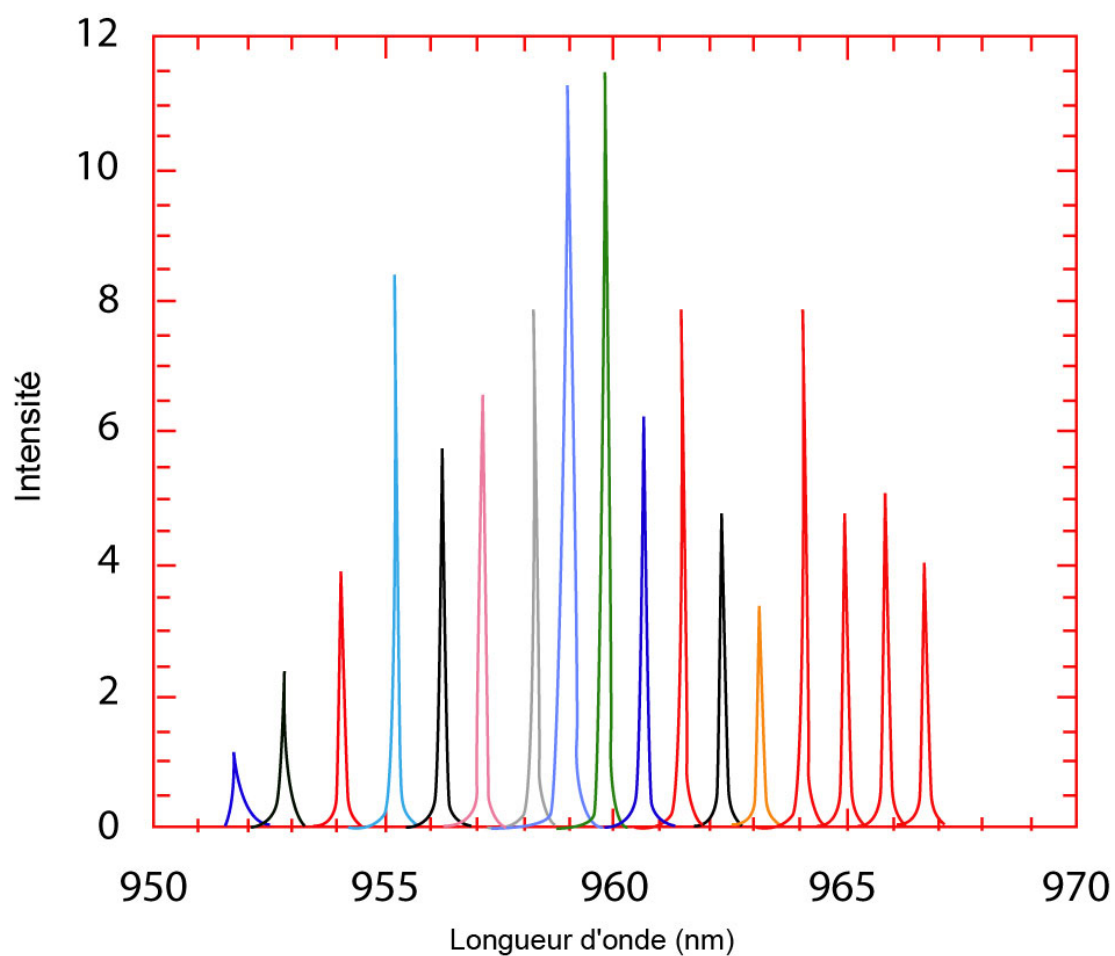
### Exemple

Exemple de VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser)







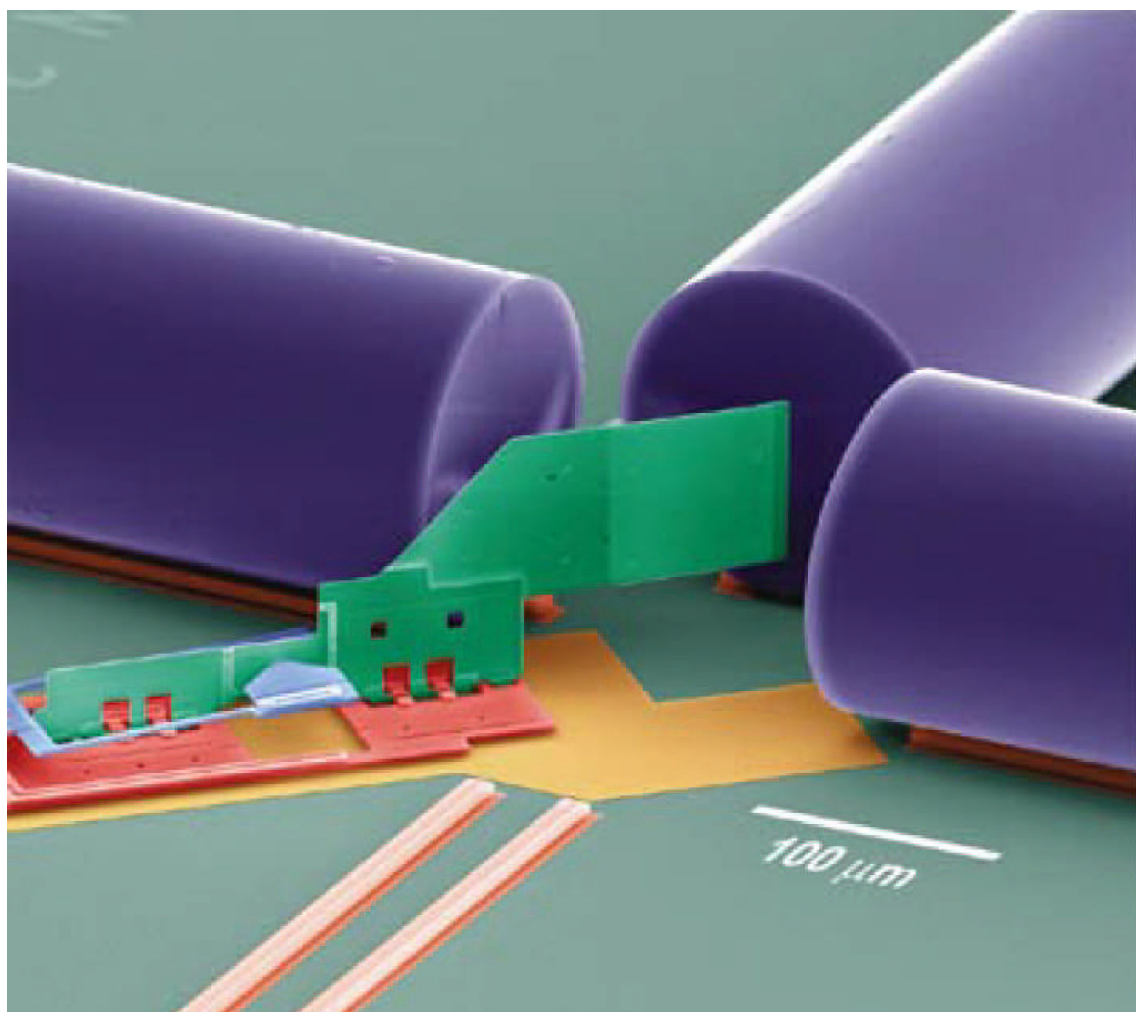


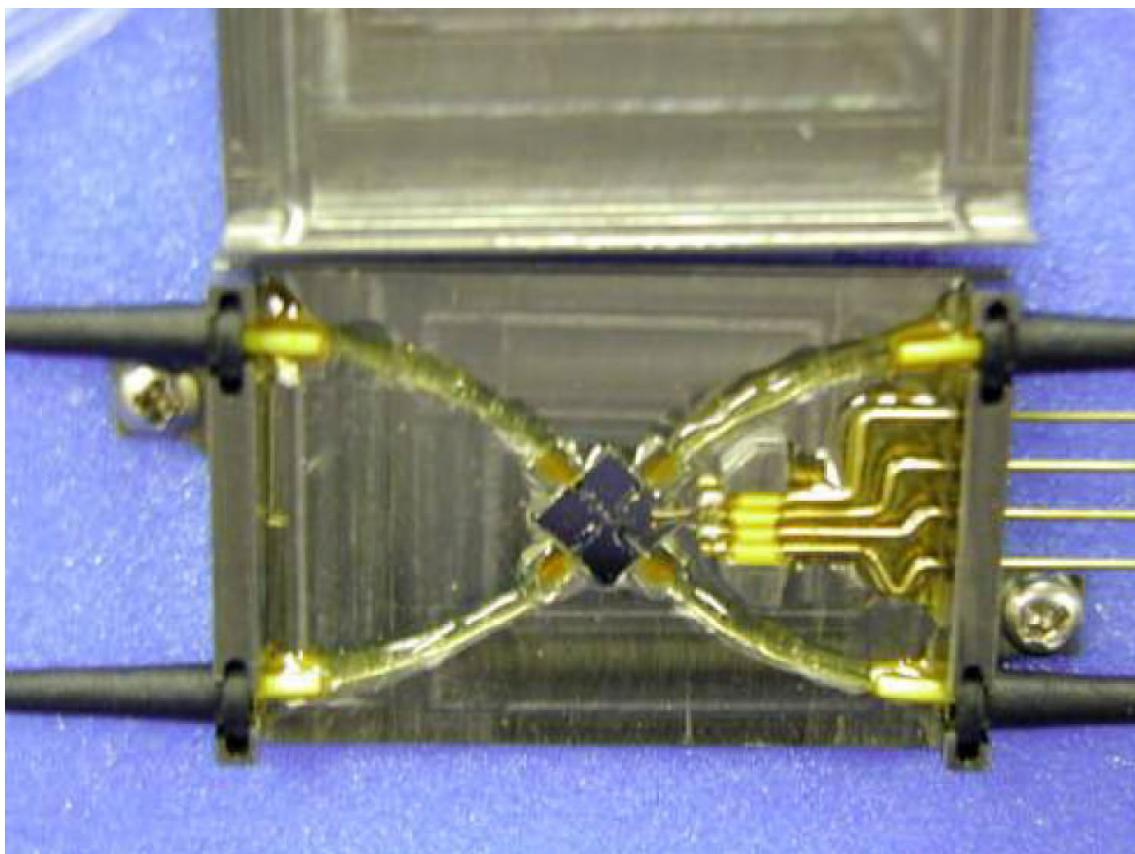
Ces micro-lasers sont accordables par des micro-déplacements du miroir déformable de sortie de la cavité.

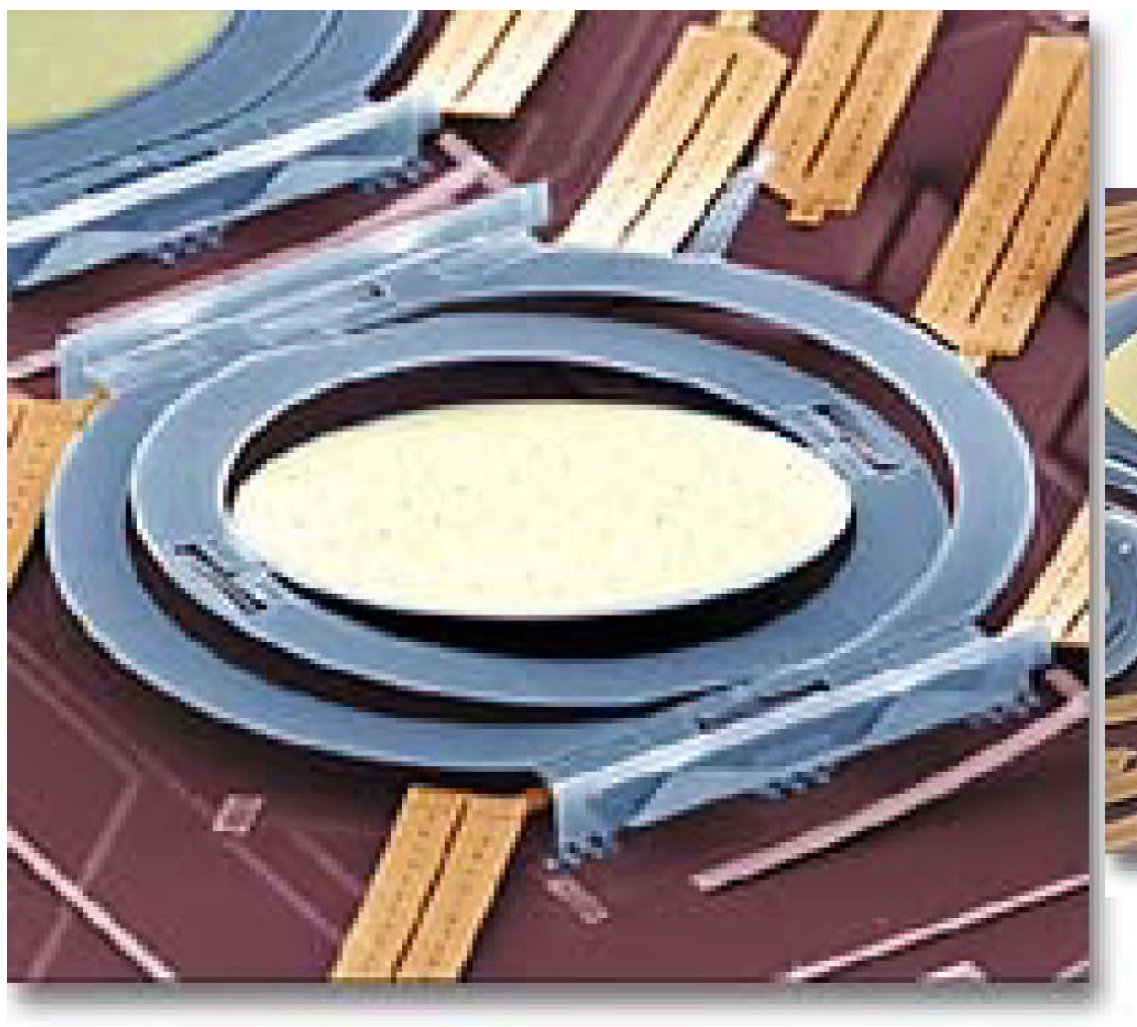
## 2.2. Les guides optiques

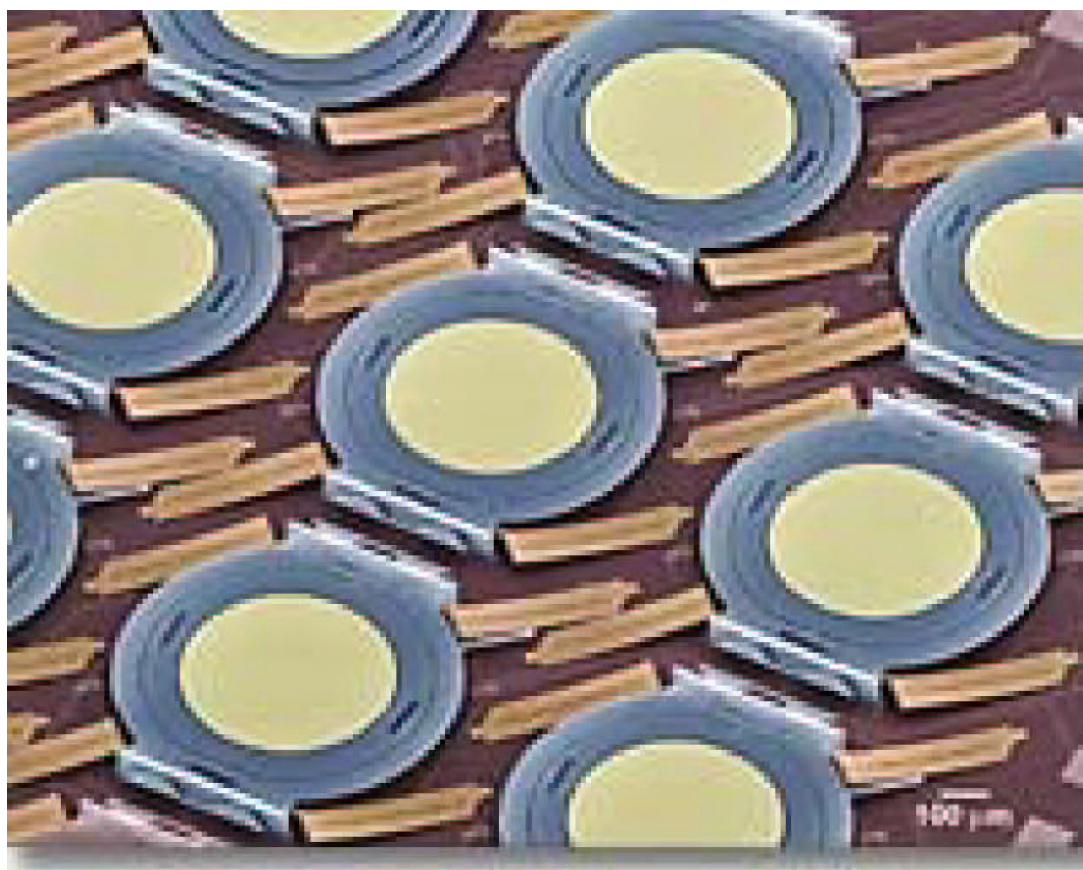
On trouve dans cette catégorie :

- des guides optiques plans
- des commutateurs optiques

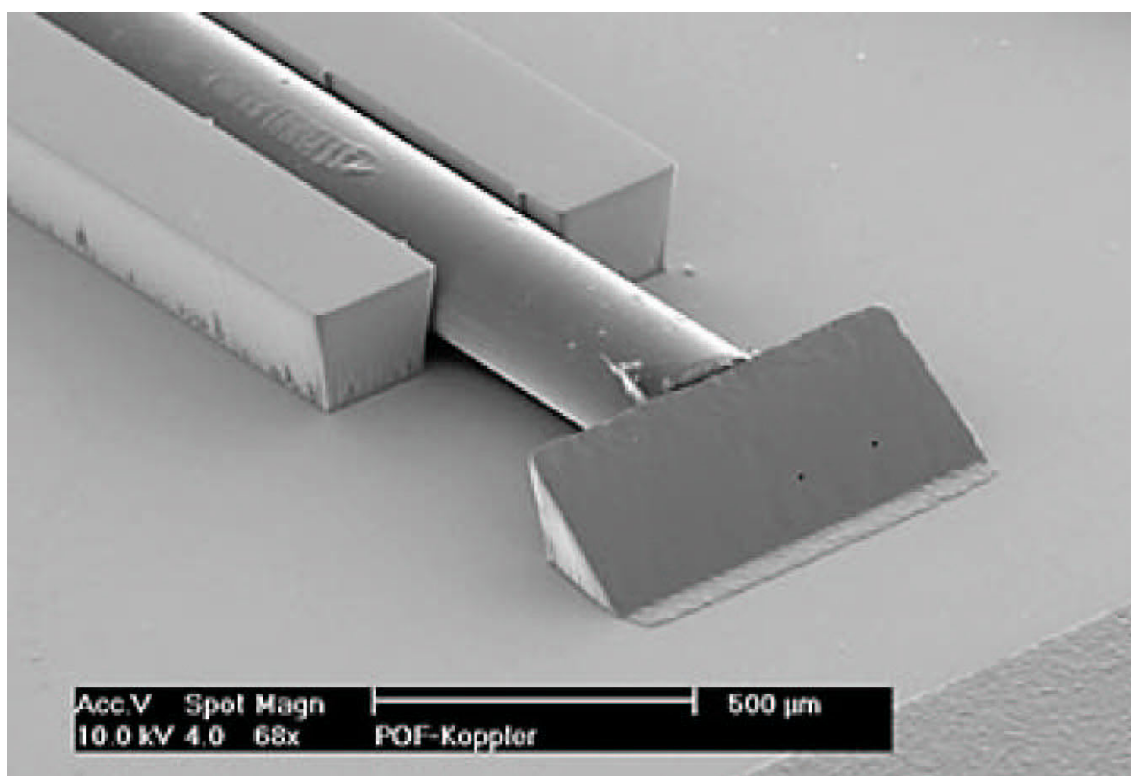


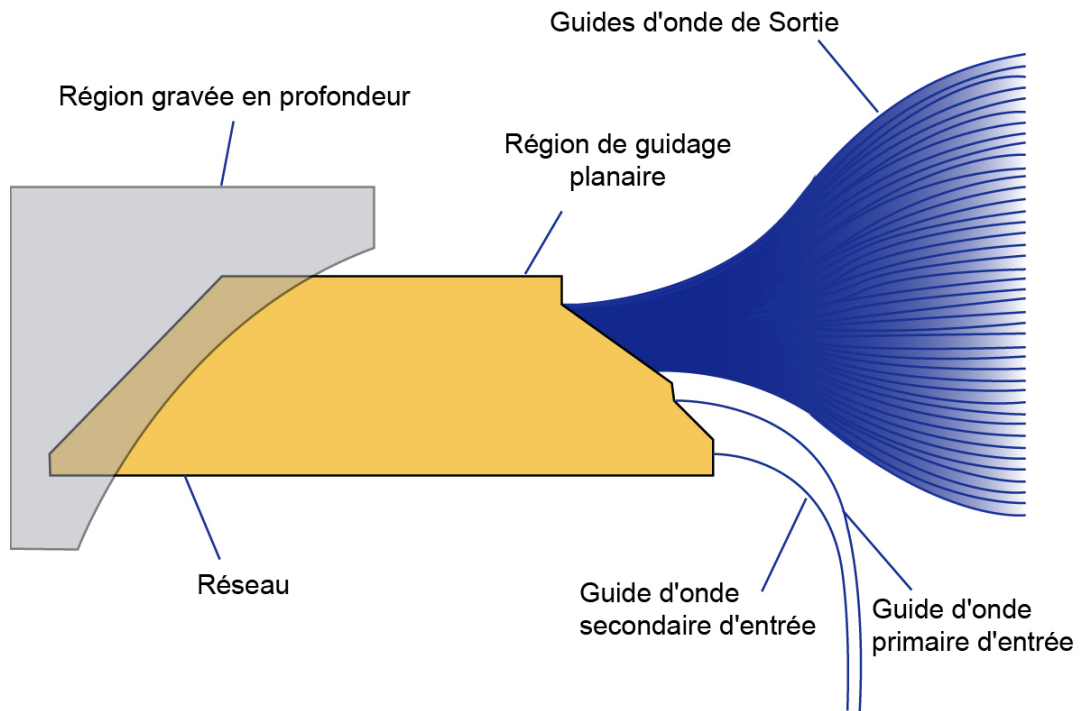






- des mélangeurs optiques

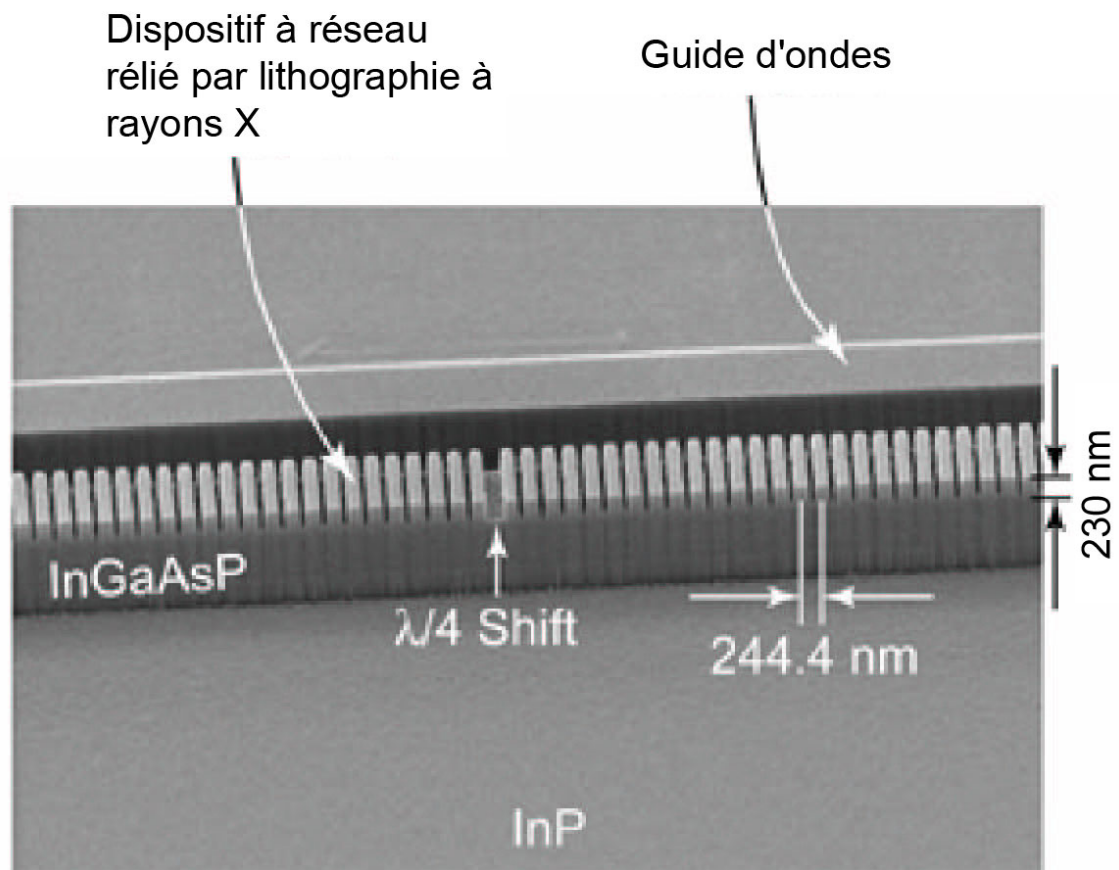


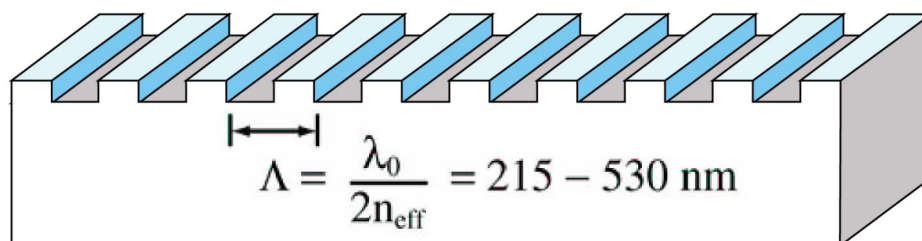
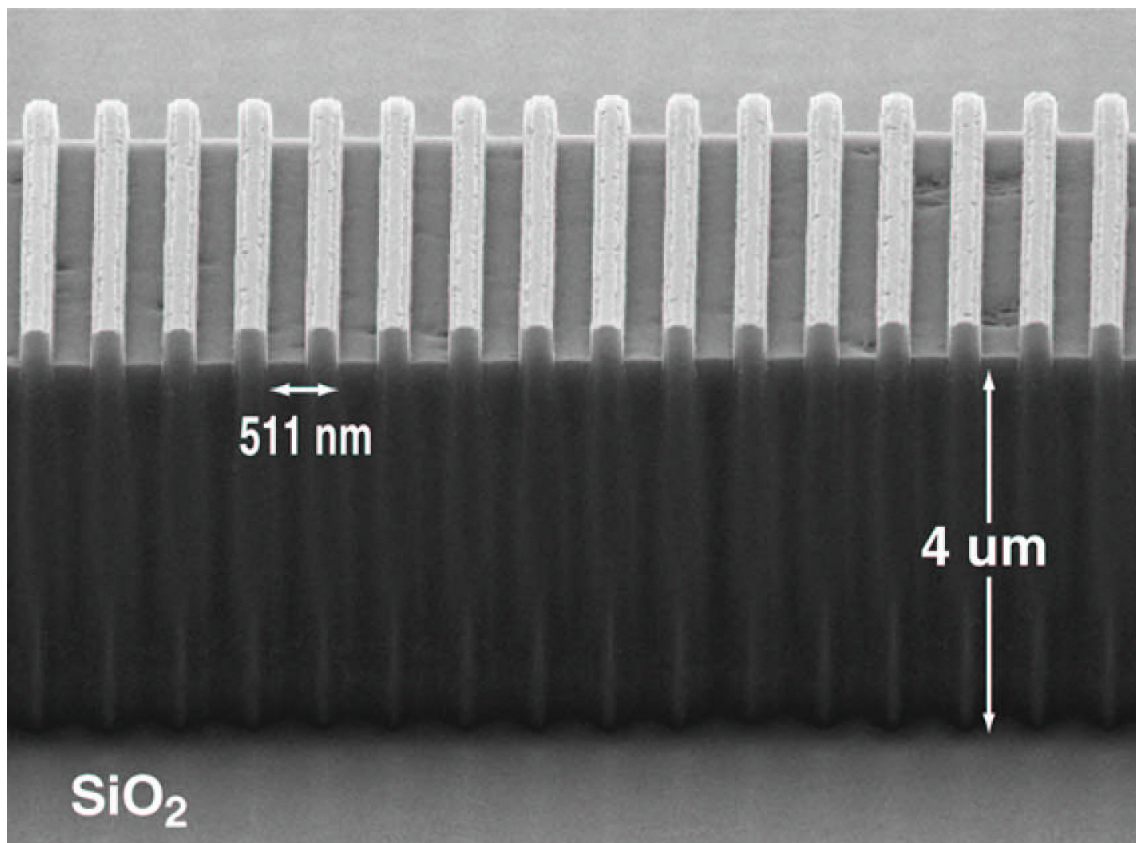


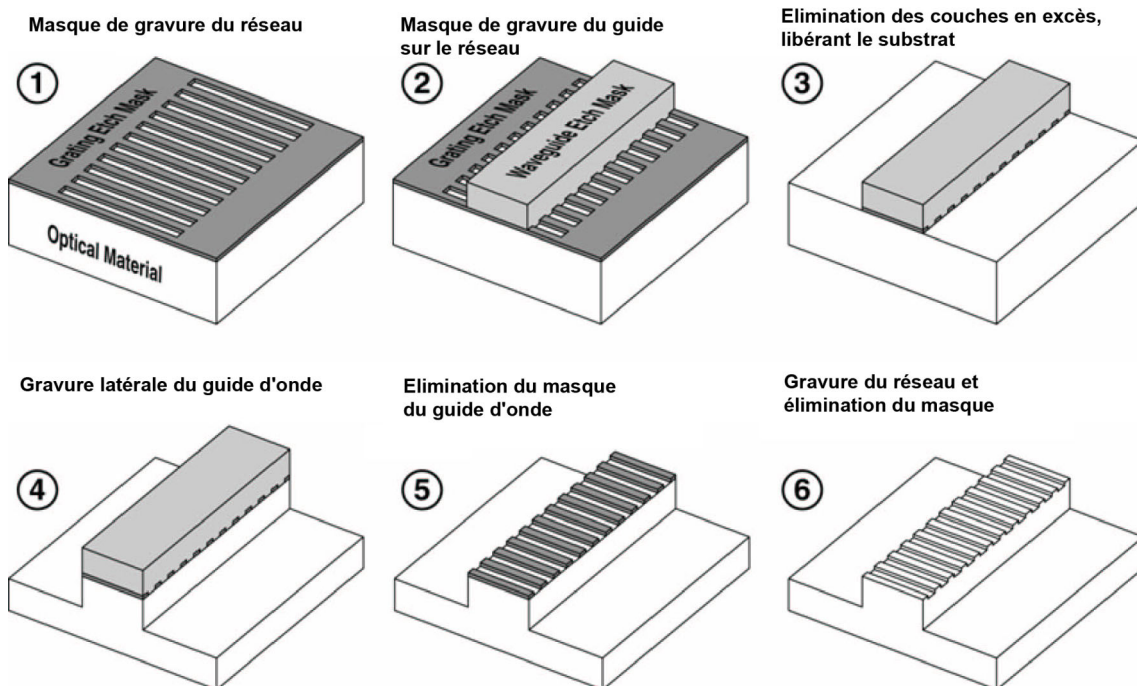
- des dispositifs d'alignement ou des sondes à fibre optique pour des capteurs ou la microscopie en champ proche



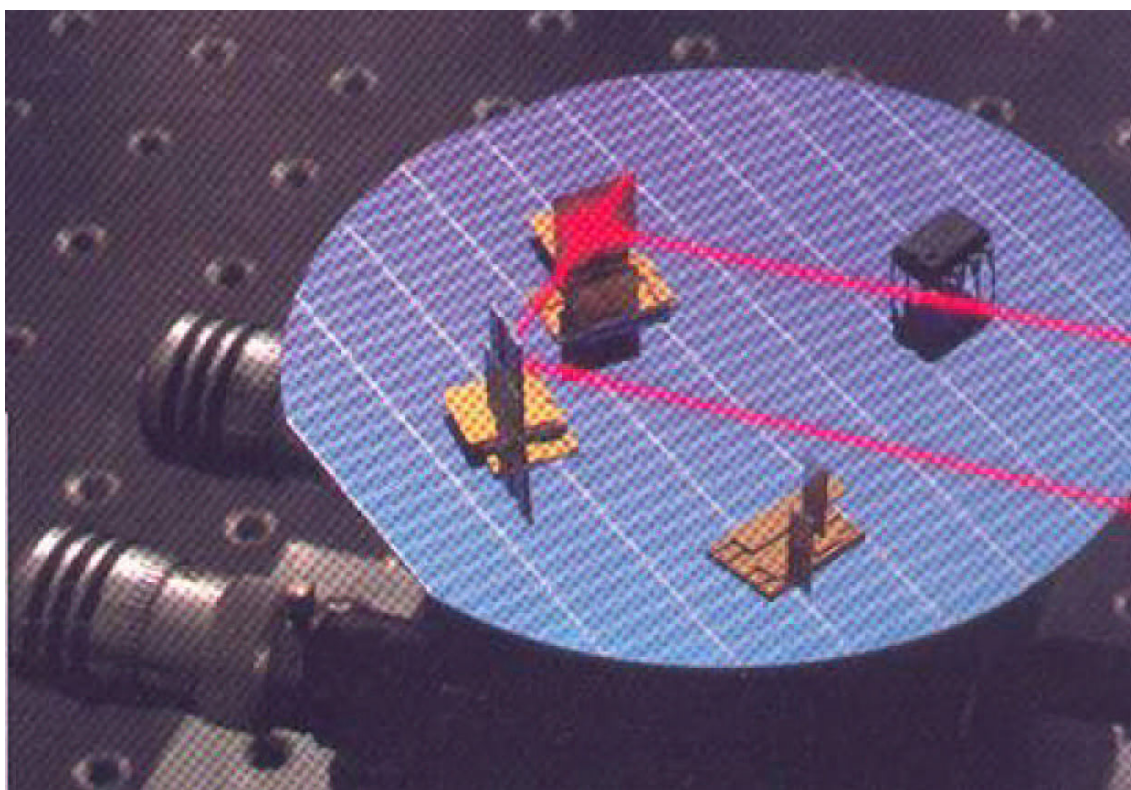
- des guides à réseaux de Bragg intégrés

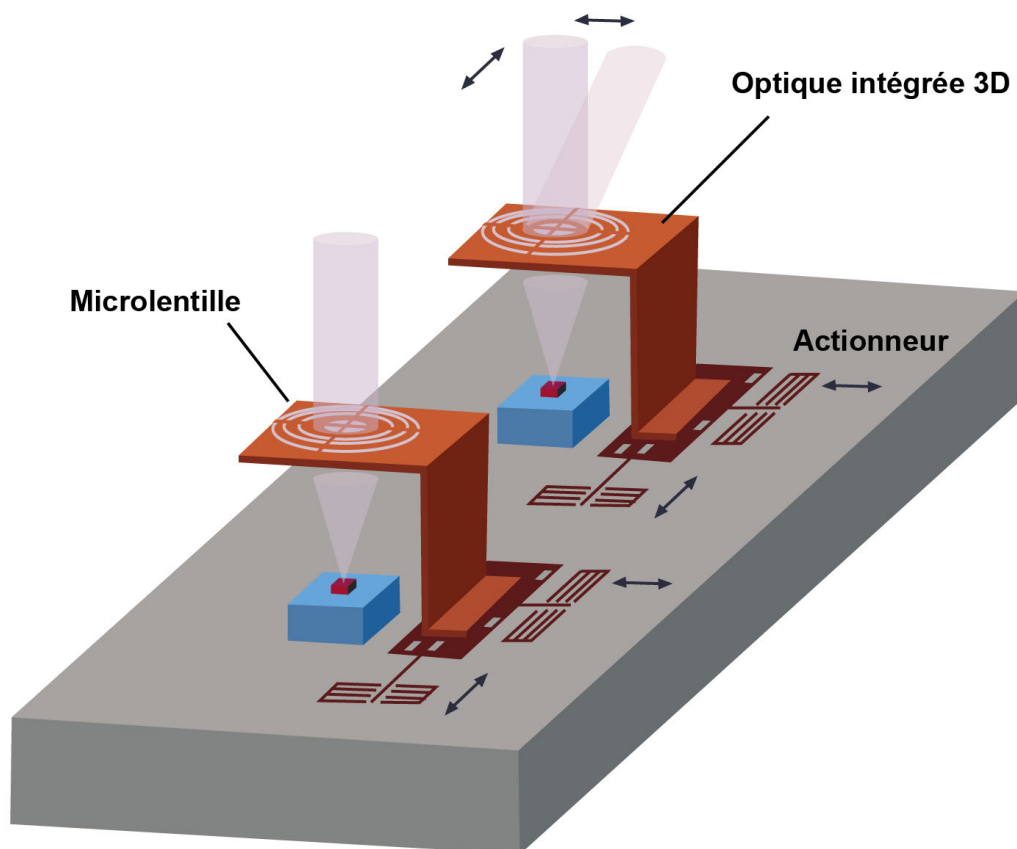






- des micro-bancs optiques

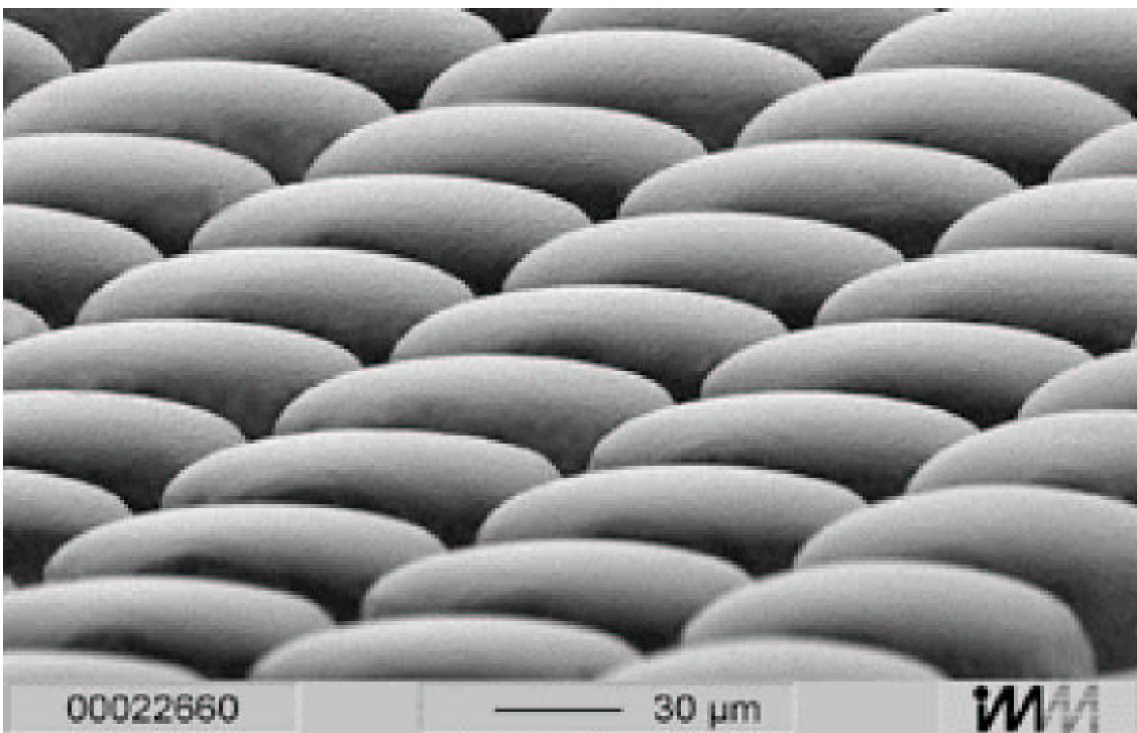
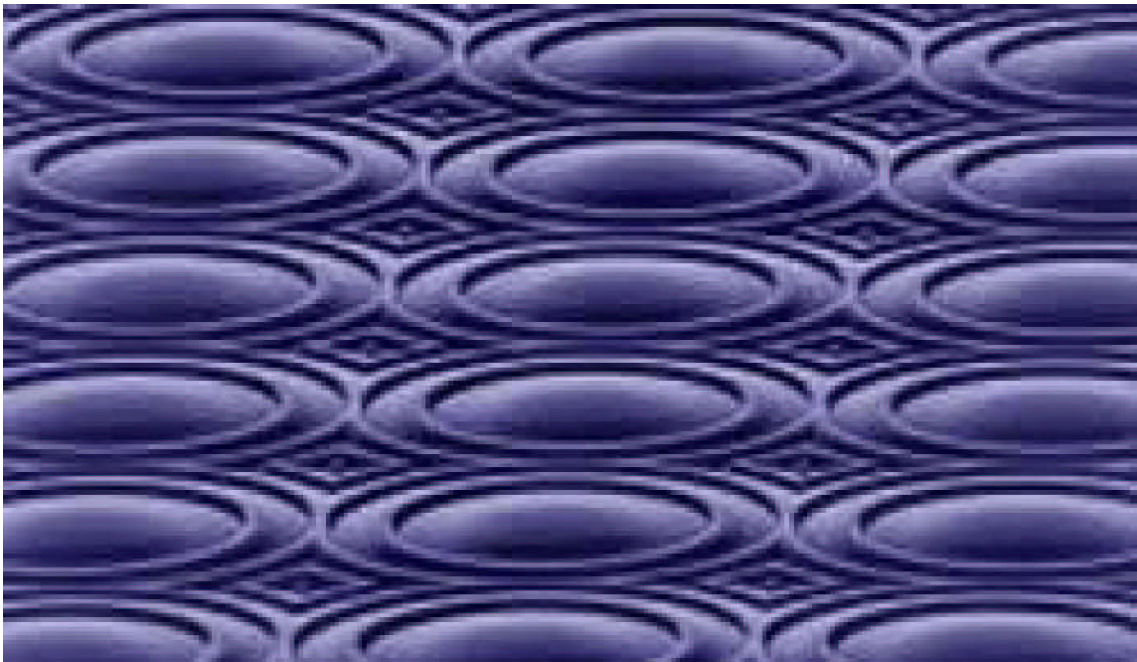




### 2.3. Les dispositifs en transmission

On trouve dans cette catégorie :

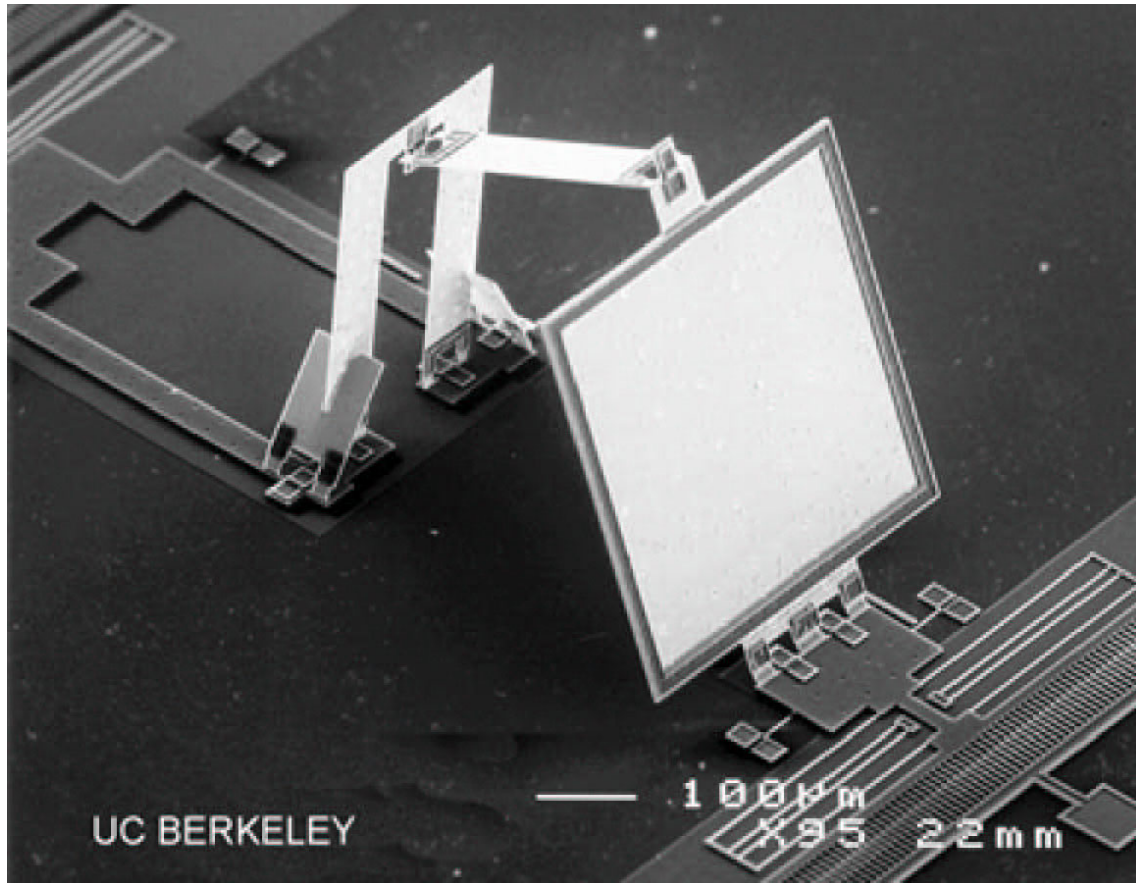
- des réseaux de microlentilles réfractives

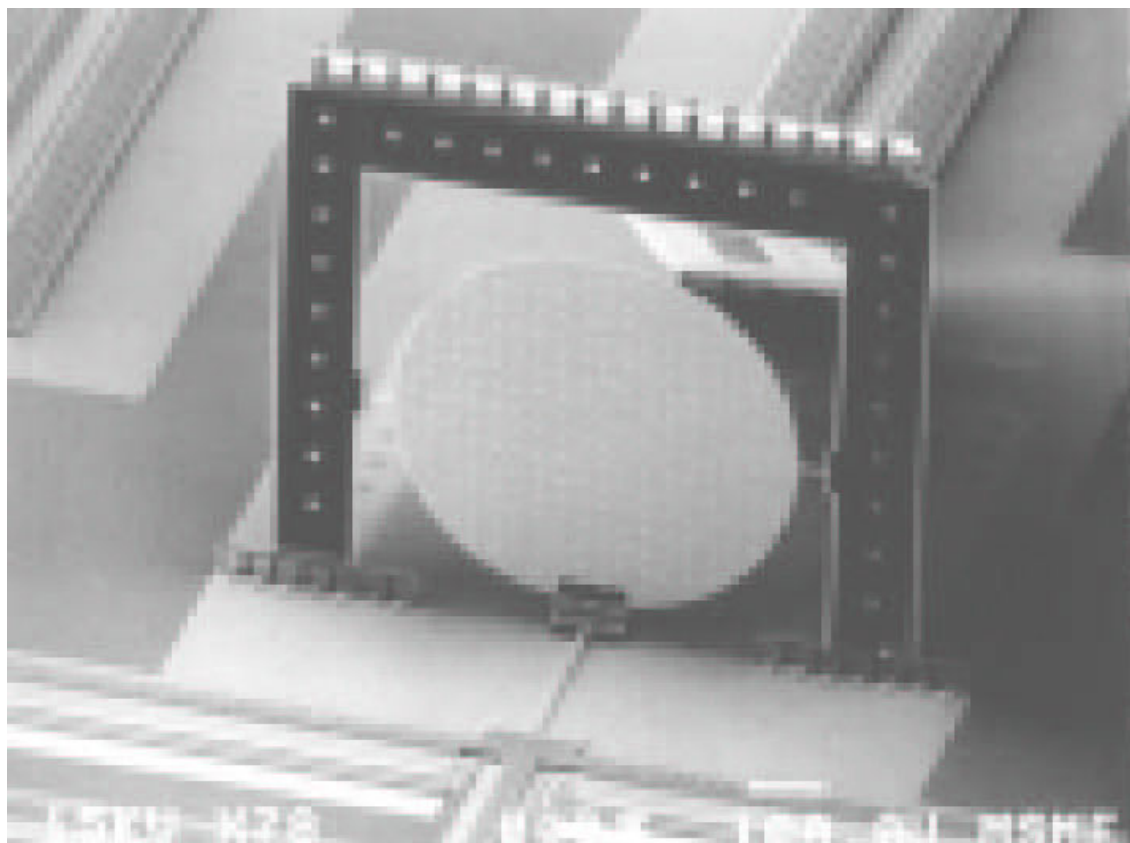


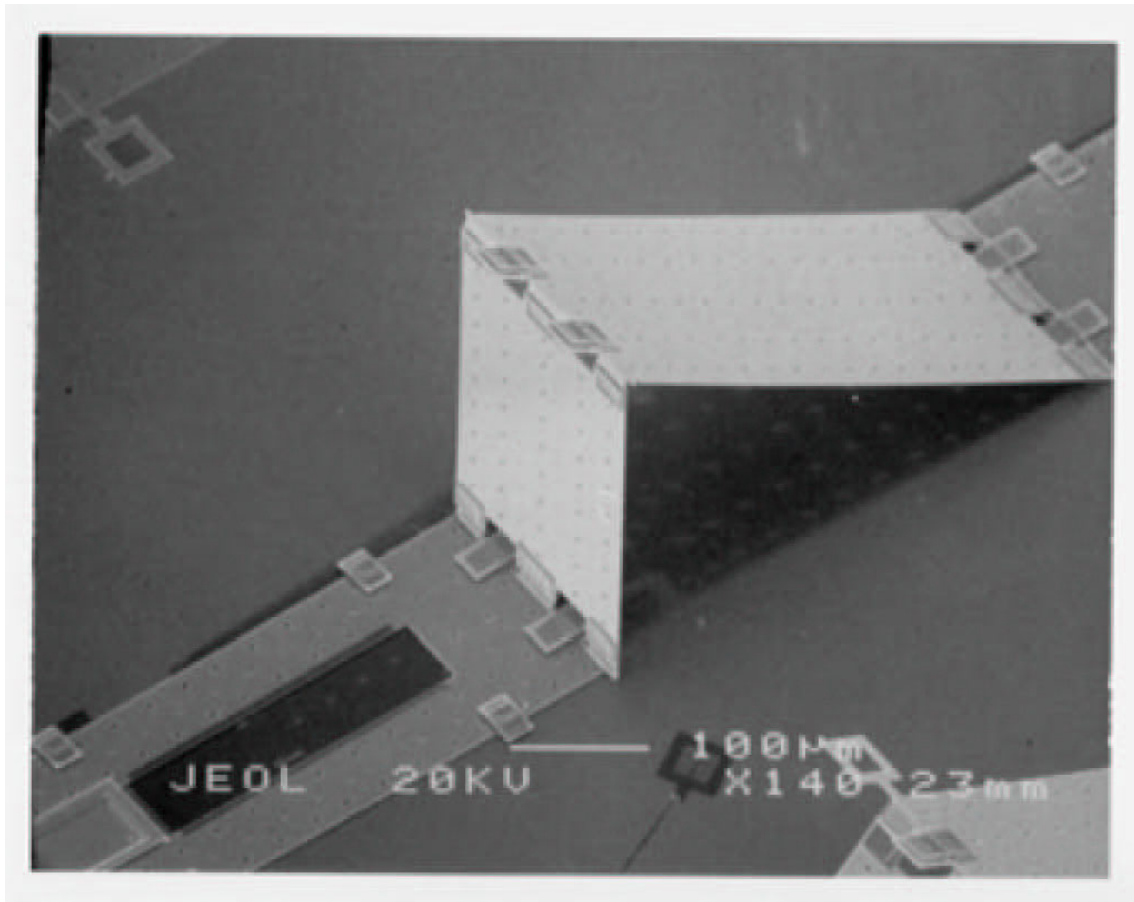
- des filtres
- des diviseurs de faisceau
- des prismes
- des portes optiques
- des interrupteurs et des choppers

## 2.4. L'optique réfléchitive

On utilise pour ces applications des couches minces réfléchissantes métalliques ou en silicium ou des structures multicouches diélectriques pour réaliser des miroirs simples ou des réseaux de miroirs pour réaliser par exemple des micro-miroirs ajustables type DMD ou bien des filtres réfléchissants accordables.



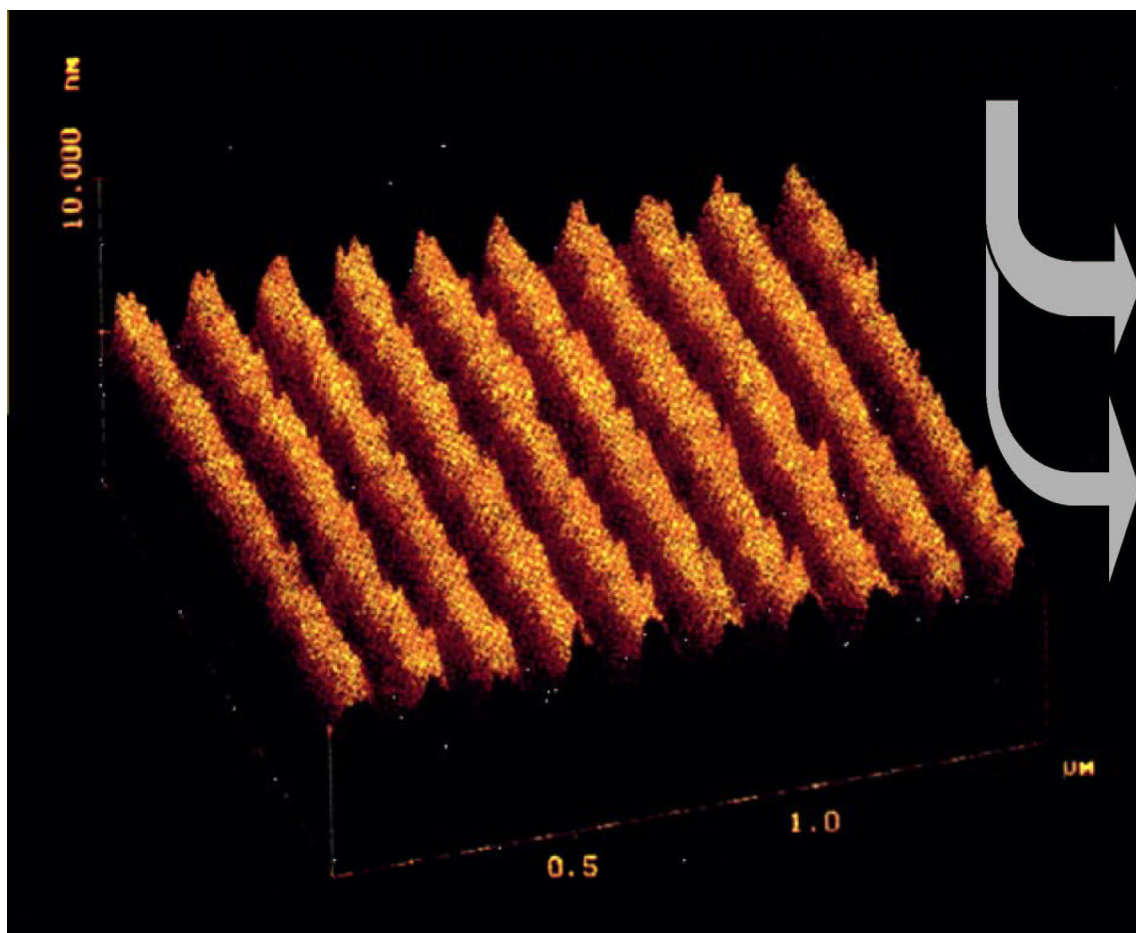


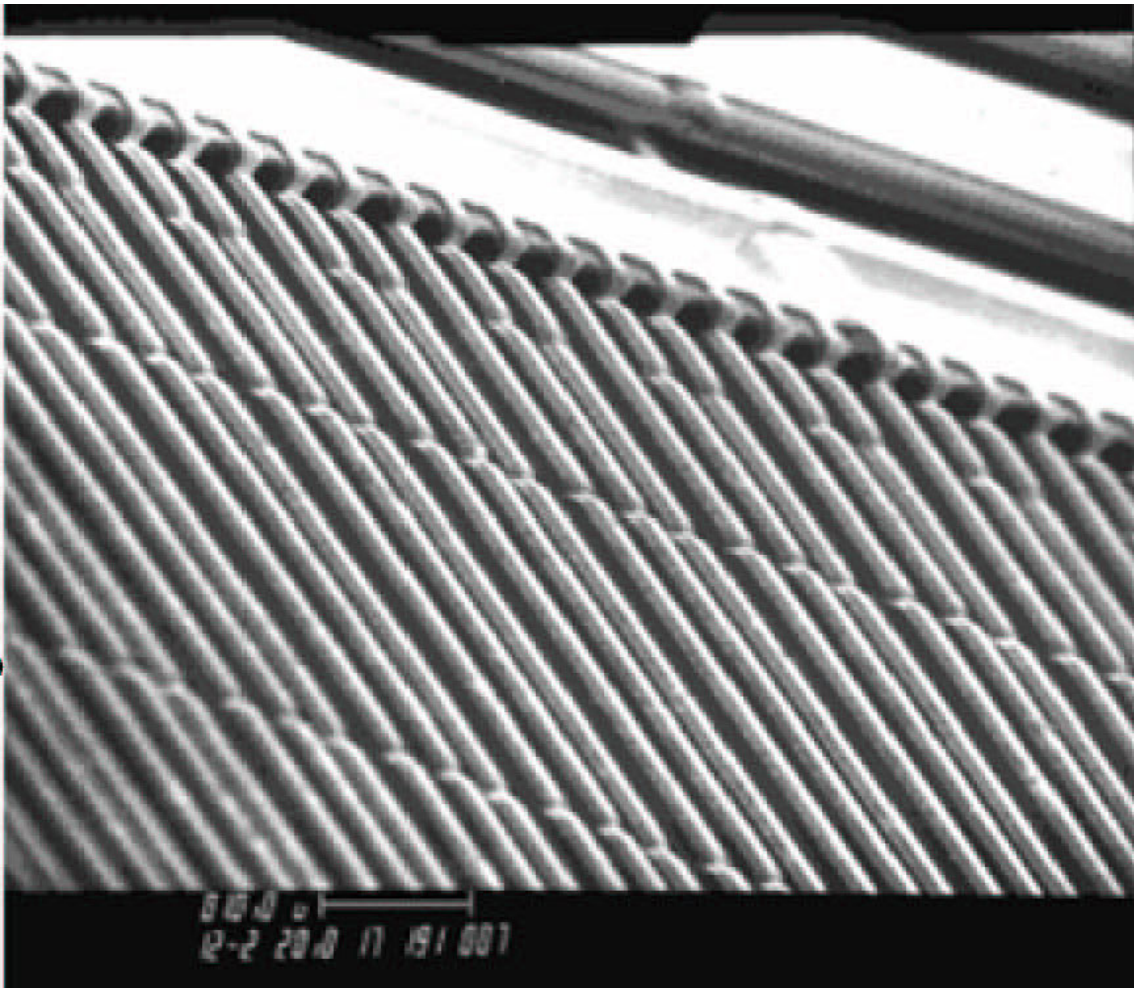


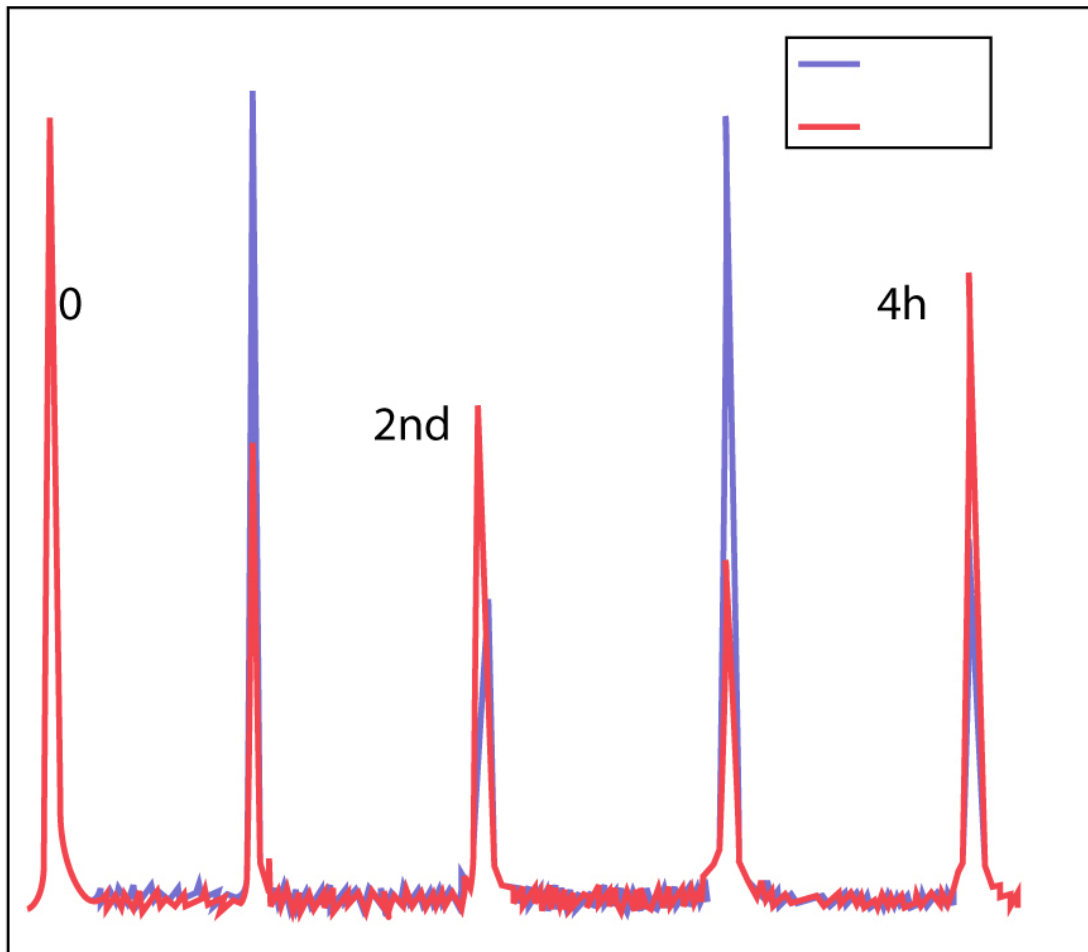
## 2.5. L'optique diffractive

On va réaliser par exemple :

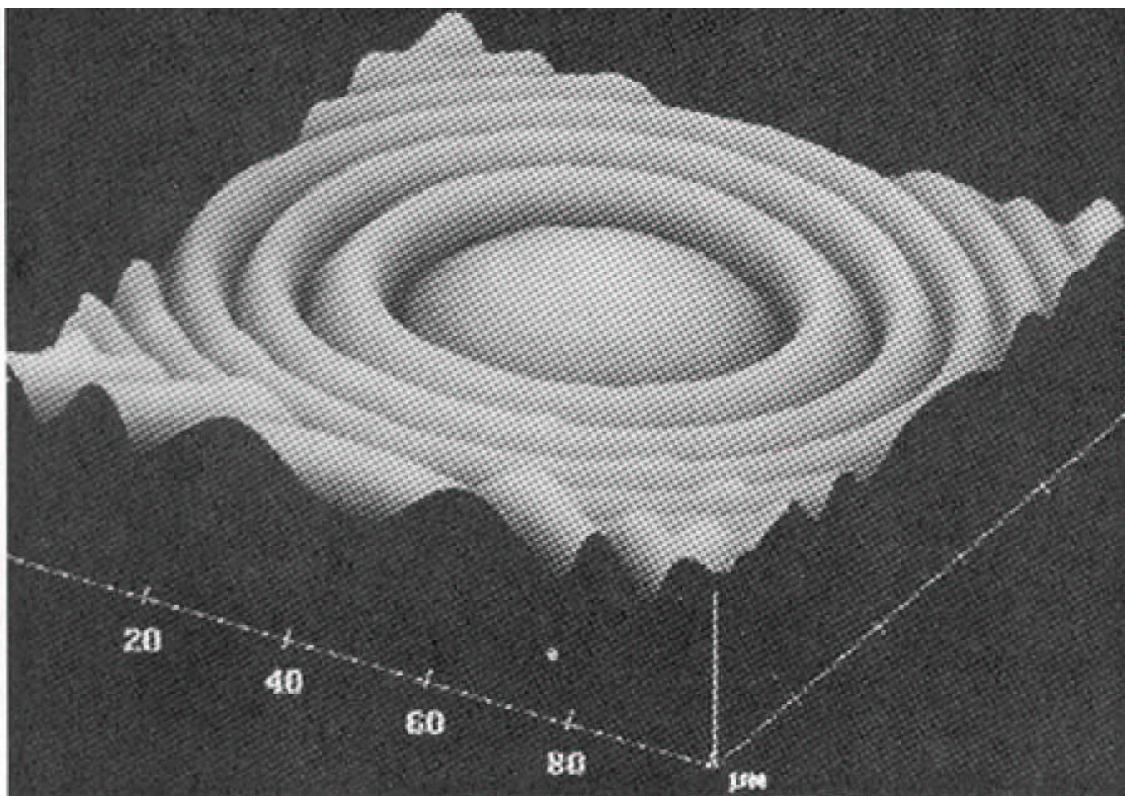
- des réseaux de diffraction







- des micro-lentilles



- des lentilles de Fresnel

par différentes techniques de gravure directes par exemple par faisceau d'électrons ou bien indirectes au travers d'un masque.

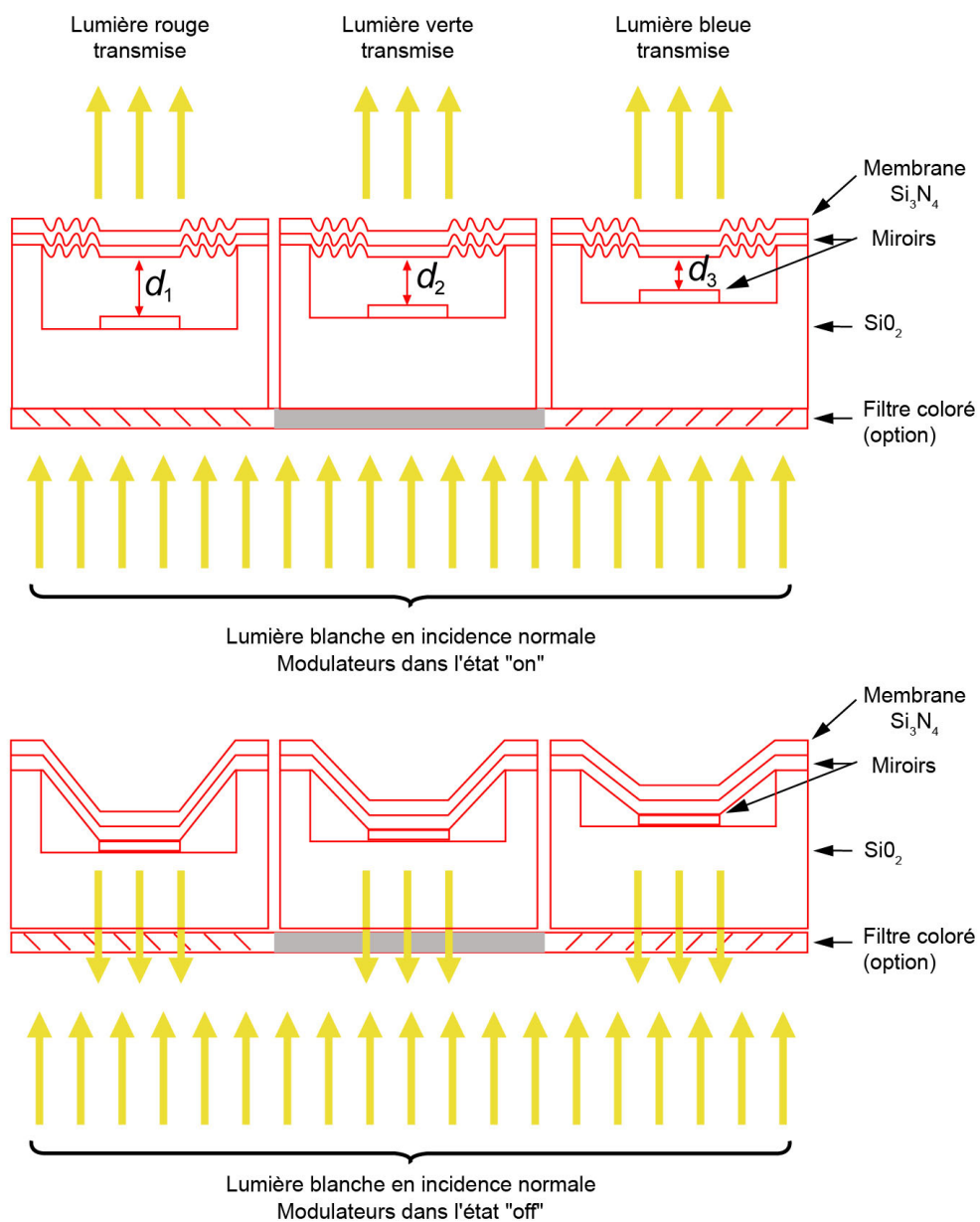
## 2.6. L'optique interférentielle

On est capable de réaliser :

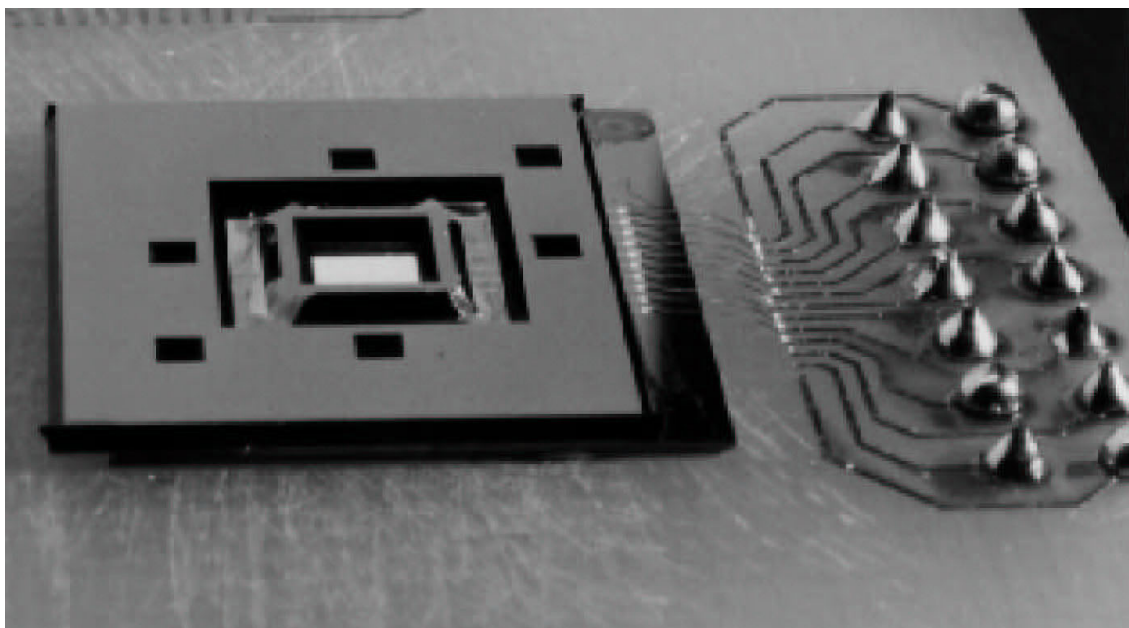
- des interféromètres de Fabry-Pérot
- des interféromètres de Mach-Zehnder
- des interféromètres de Michelson

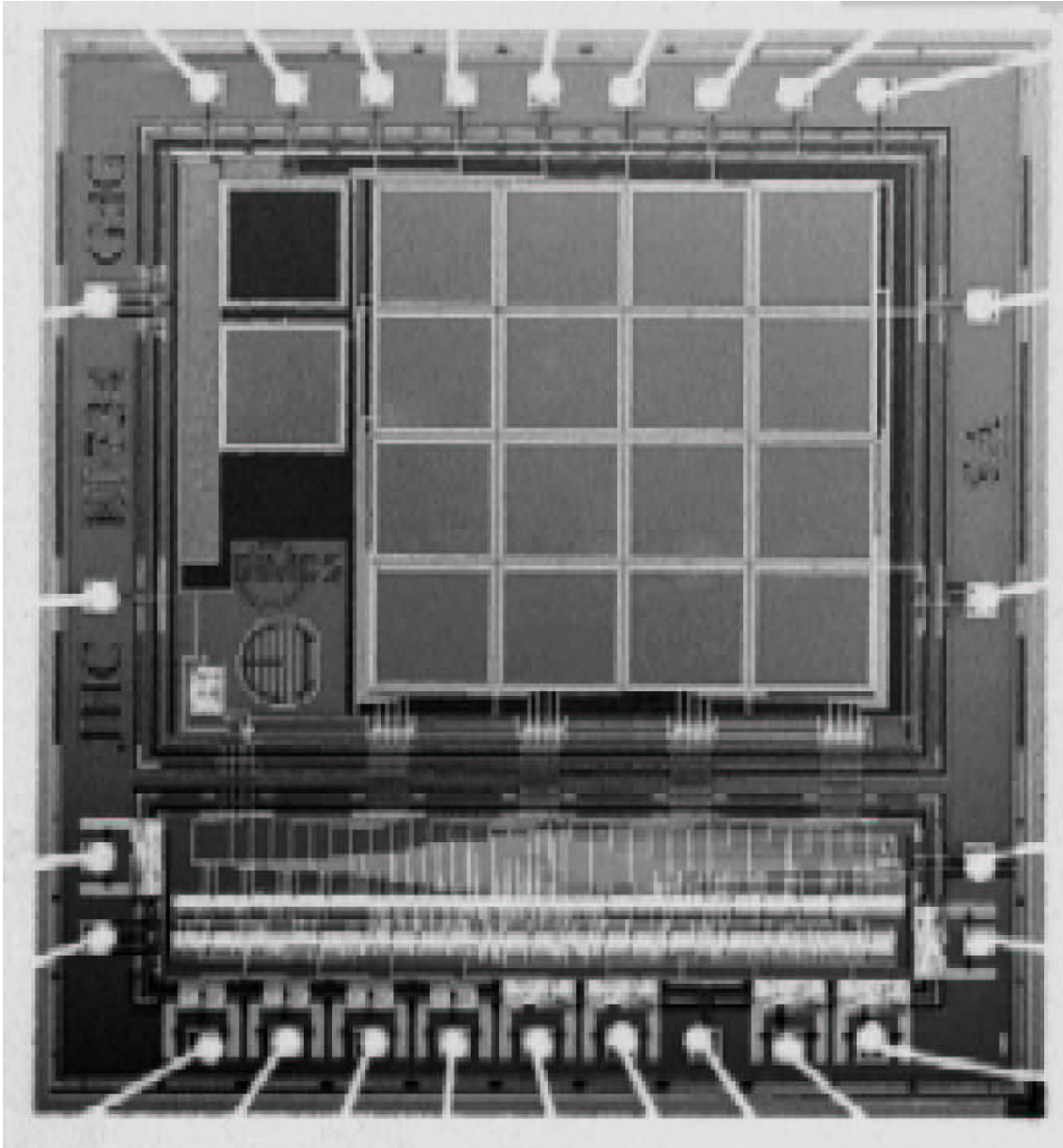
à base de microsystèmes optiques.

Pour ce qui concerne les interféromètres de Fabry-Pérot, il s'agit de structures multicouches membranaires dans lesquelles l'actionnement mécanique ou électromécanique du mouvement de la membrane suspendue permet de modifier la longueur du chemin optique de la lumière pour faire changer la gamme de longueur du spectre de la lumière transmise.

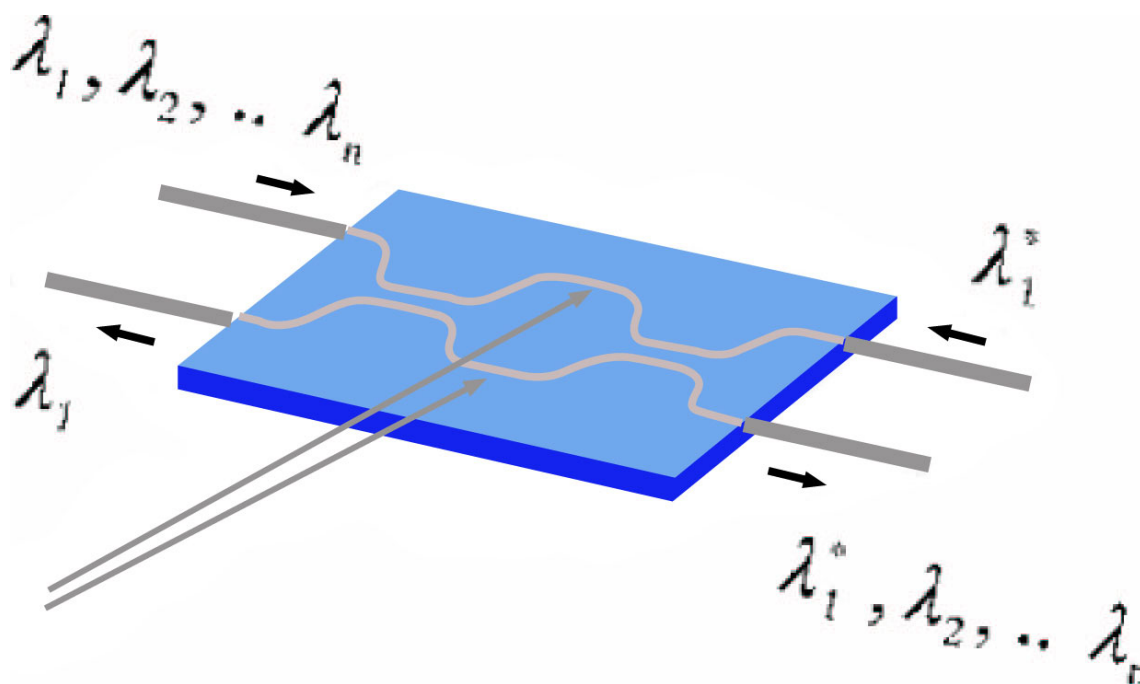


Il est également possible de réaliser des réseaux d'interféromètres de Fabry-Pérot notamment pour couvrir des régions spectrales plus étendues.





Les autres types d'interféromètres peuvent être réalisés en optique intégrée et utilisent des coupleurs directionnels dont les perturbations apportées aux différents bras permettent de modifier les états de phase des ondes incidentes au niveau du coupleur pour faire évoluer la figure d'interférences en sortie.



## 2.7. Les détecteurs

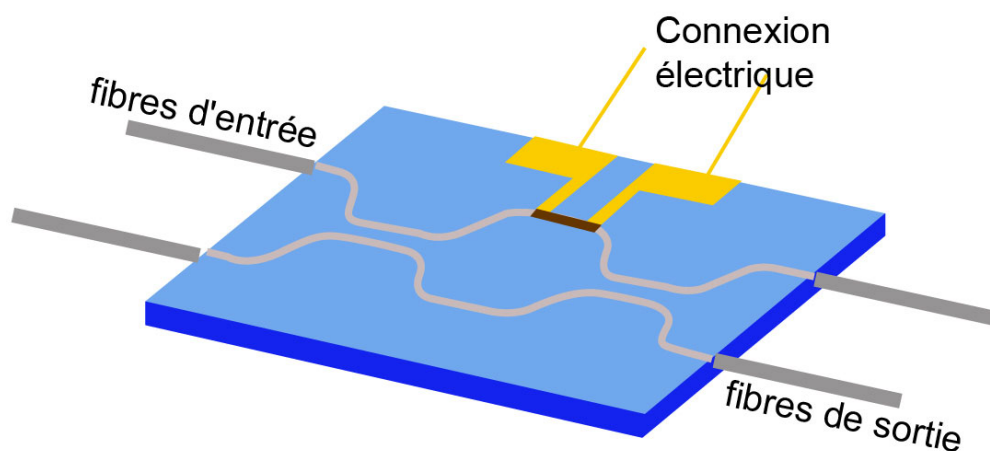
On retrouve dans cette catégorie :

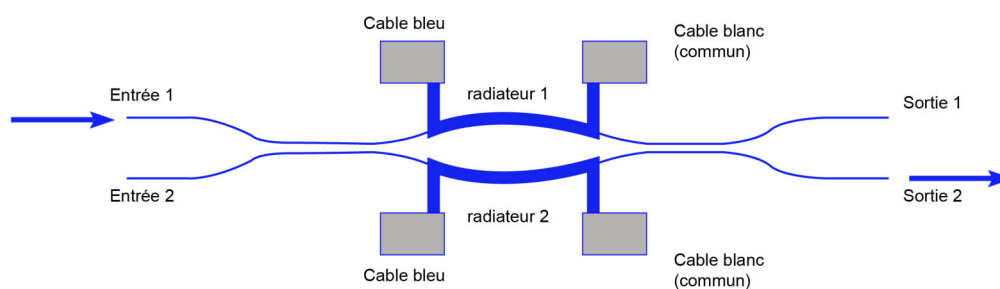
- les photodiodes qui sont intégrables dans des microsystèmes plus complexes
- des microbolomètres utilisant les variations de microrésistances électriques pour mesurer des flux d'intensité lumineuse.

## 2.8. Les applications principales

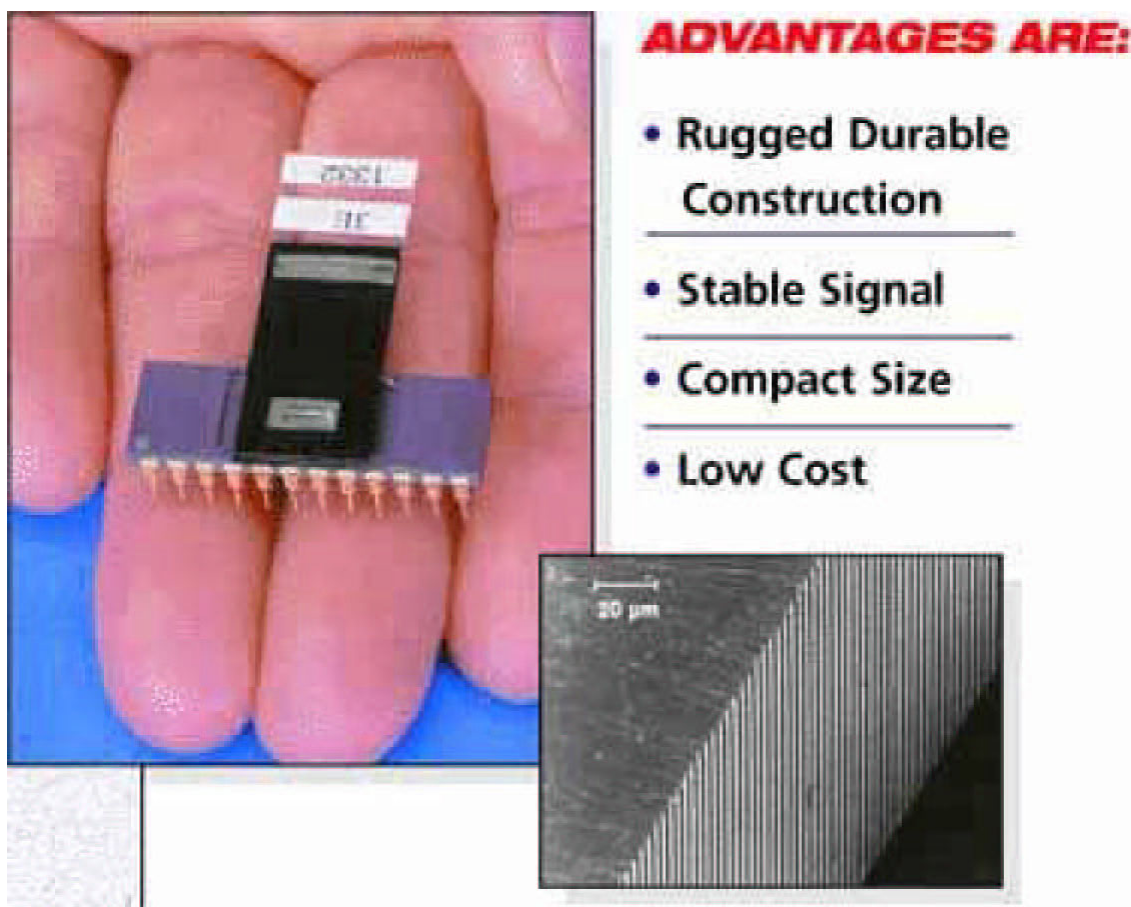
Les différentes catégories de microsystèmes décrites précédemment peuvent être combinées pour permettre de réaliser :

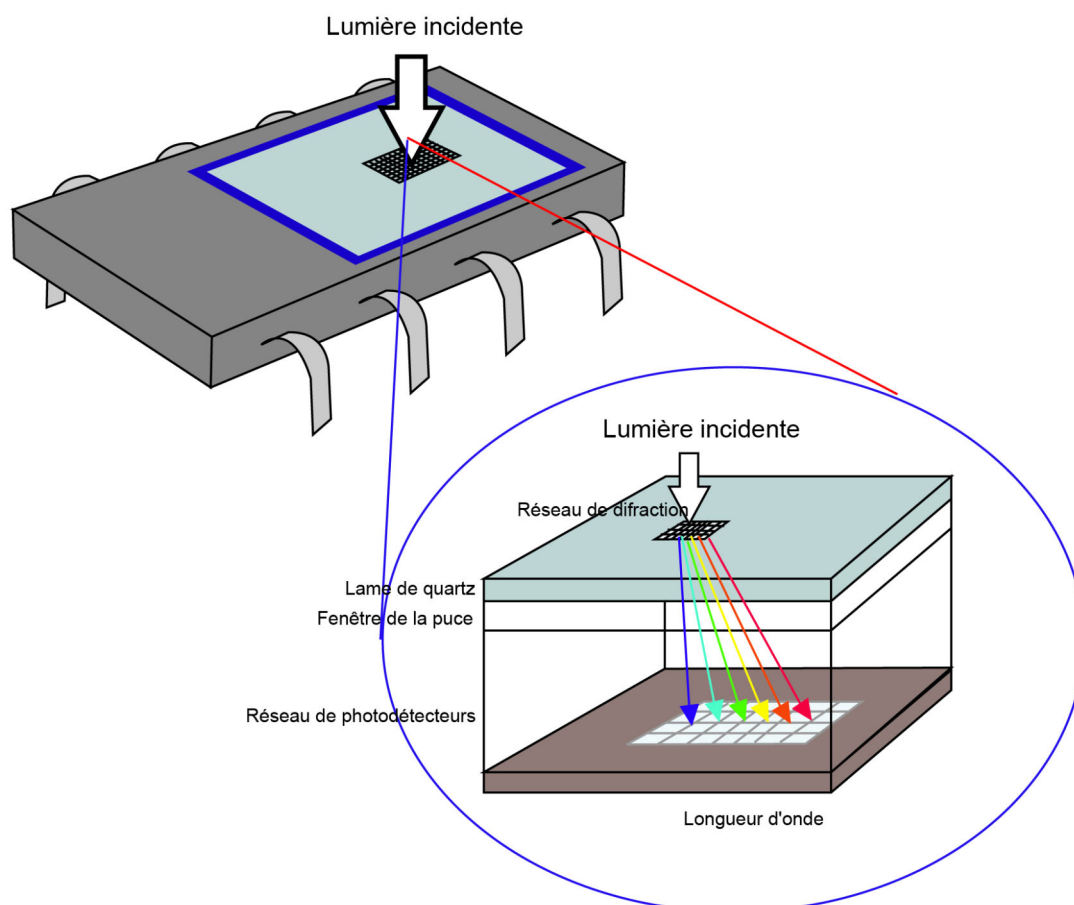
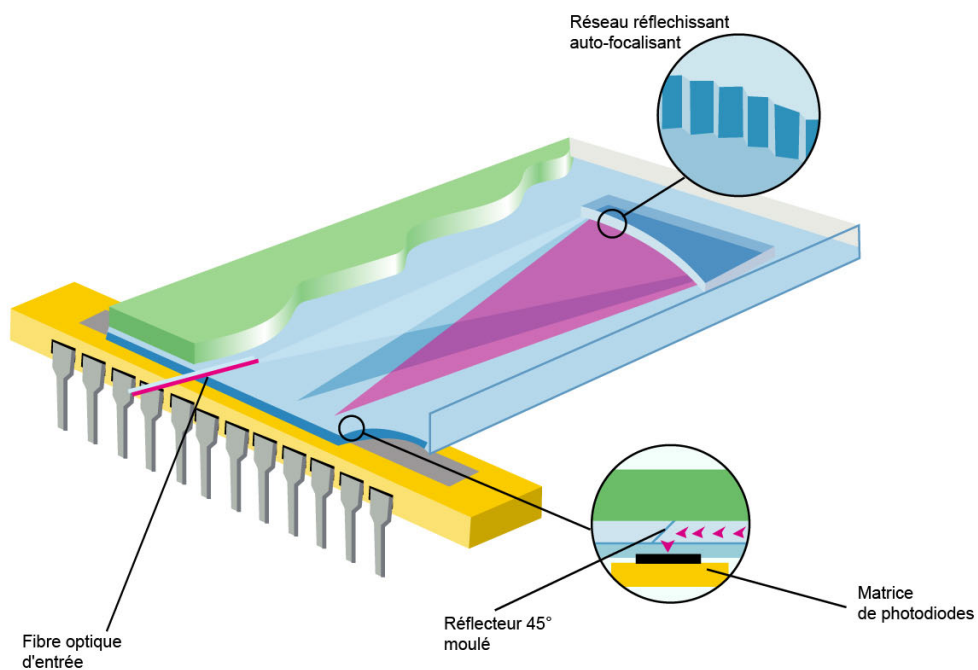
- des commutateurs optiques, par exemple en utilisant un principe interférométrique en optique intégrée





- des spectromètres, par exemples en utilisant des interféromètres de Fabry-Pérot ou bien comme ci-dessous en utilisant la dispersion par un réseau de diffraction





- des modulateurs de lumière pour réaliser des systèmes d'affichage notamment.

## 3. Brèves études de cas

L'étude des technologies des microsystèmes optiques montre que les mêmes technologies de base ont souvent été utilisées pour des applications radicalement différentes.

### 3.1. Les micro-miroirs digitaux

Dans le domaine de l'information numérique, la plupart des applications multimédia nécessitent à la fois des écrans plus brillants et plus larges en même temps qu'ils ont compacts et personnalisés. Les systèmes de projection conventionnels de films ne sont pas aptes à afficher les informations multimédia numériques. De nombreuses technologies électroniques d'affichage ont été développées depuis les années 1940. A l'heure actuelle, il y a deux technologies principales en compétition l'une avec l'autre sur un marché en croissance rapide : la technologie DLP (Digital Light Processing) et la technologie de projection LCD à polymère haute température. La technologie DLP est en avance très nette sur le marché des projecteurs de grande dimension de coût élevé et sur le marché des projecteurs ultra-portables à bas coût alors que la technologie LCD domine le marché intermédiaire.

Les projecteurs de grande dimension peuvent éclairer avec un flux de plus de 5000 lumens sur un écran. Ils coûtent très chers, ils sont lourds, massifs et nécessitent des précautions d'installation et de maintenance.

Au cœur d'un projecteur numérique DLP on trouve le système DMD (Digital Micromirror Device) breveté par Texas Instruments (cf Étude de cas du cours Introduction à la micro-optique) qui est constitué d'une matrice de micro-miroirs. Chacun des micro-miroirs pivote sous l'effet d'un champ électrostatique agissant sur le substrat sur lequel il est déposé. En fonction de l'angle de pivotement ( $+10^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $-10^\circ$ ), chaque miroir réfléchit la lumière émise par la lampe de projection de façon à réaliser une commutation on/off du flux lumineux et on peut ainsi créer numériquement une échelle des niveaux de gris sur 10 bits (1024 niveaux) pour chaque couleur primaire. L'image en couleur est ainsi obtenue soit avec des roues colorés et un seul dispositif DMD soit avec des miroirs dichroïques et en combinant des prismes avec trois dispositifs DMD pour chacune des trois couleurs primaires. Les signaux vidéos ou graphiques d'entrée sont transformés en un code numérique binaire qui fait pivoter les micro-miroirs.

Les dispositifs DMD sont constitués de micro-miroirs déposés sur des circuits CMOS de commande selon le schéma ci-dessous :

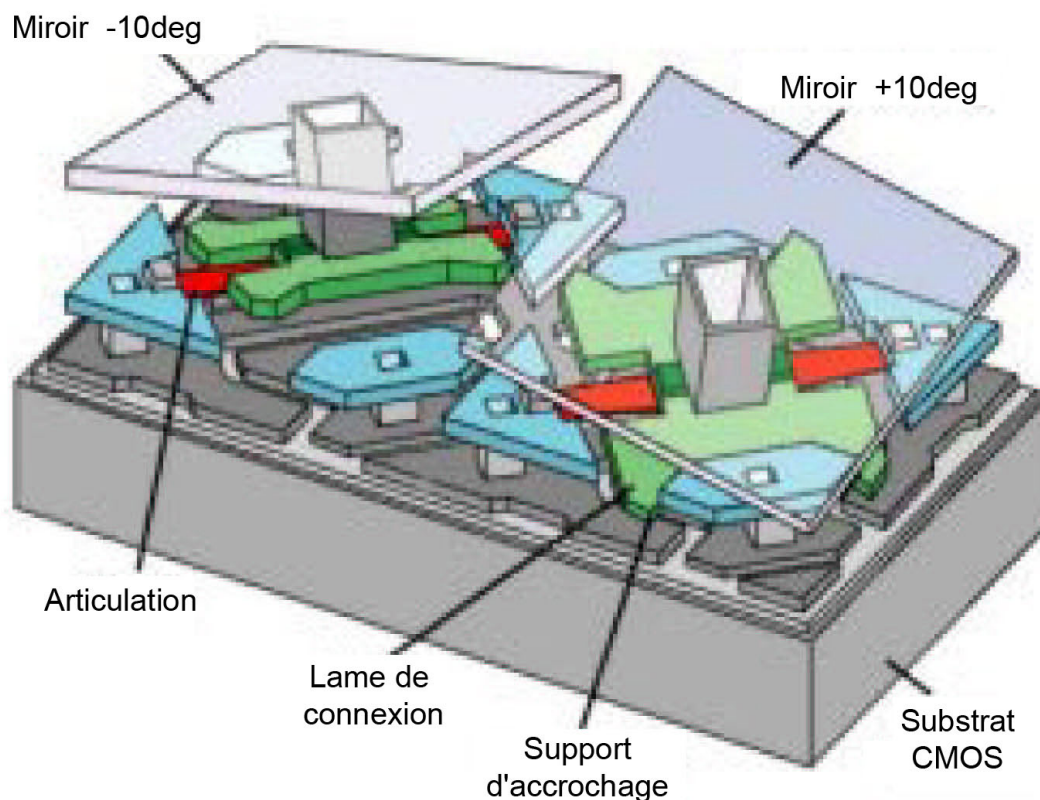


Figure 1

Le dispositif DMD est fabriqué d'un seul bloc par un processus compatible CMOS. Chaque micro-miroir est constitué d'une couche d'aluminium de  $16\mu\text{m} \times 16\mu\text{m}$ . Le pivotement se fait selon l'axe de la diagonale du miroir sous l'effet de l'attraction électrostatique.

La plus grande difficulté technique de ces dispositifs consiste à assurer la fiabilité mécanique. Du fait de la vitesse de modulation élevée, le couple de torsion nécessite une fiabilité de plus de 1013 cycles au cours de sa vie en service. Les défauts ont été progressivement résolus par des améliorations continues de la conception au cours des dix dernières années.

### 3.2. Les matrices de micro-miroirs en couches minces

Les matrices de micro-miroirs en couches minces permettent des modulateurs spatiaux de lumière de type réflectif. Des actionneurs constitués de couches minces piezoélectriques micro-usinées sont utilisés pour contrôler l'angle de pivotement de chaque micro-miroir de la matrice de façon à définir l'échelle des niveaux de gris de chacun des pixels de l'écran. La lumière réfléchiée à la surface d'un miroir forme une image de forme rectangulaire sur le plan de l'écran d'arrêt de projection et cette image se déplace le long de l'axe horizontal au fur et à mesure que l'angle de pivotement change. Lorsqu'un micro-miroir ne pivote pas, toute la lumière réfléchiée est bloquée et absorbée sur l'écran d'arrêt et l'image du pixel sur l'écran est dans l'état éteint. Quand le micro-miroir est au pivotement maximal, toute la lumière réfléchiée passe au travers de l'écran d'arrêt, l'image du pixel sur l'écran est dans l'état allumé. La quantité de lumière qui passe au travers de l'écran d'arrêt est proportionnelle à l'angle d'inclinaison de chaque miroir. Un contrôle précis des angles de pivotement permet de générer des niveaux de gris sur l'écran entre les états de brillance extrême (éteint-allumé). Pour cela les systèmes à micro-miroirs en couches minces partagent la nécessité fonctionnelle de pouvoir réaliser des matrices avec le système DMD à laquelle ils ajoutent la nécessité du contrôle nanométrique de la précision du positionnement pour les échelles de niveaux de gris.

Chaque pixel consiste en une structure bicouche : une couche miroir et une couche actionneur. Le pivotement du miroir est assuré par un actionneur couche mince piézoélectrique sous la forme d'une micro-poutre mono-encastree. Comme on peut le voir sur l'image ci-dessous, un miroir est connecté à la poutre mono-encastree inférieure par un bras de suspension.

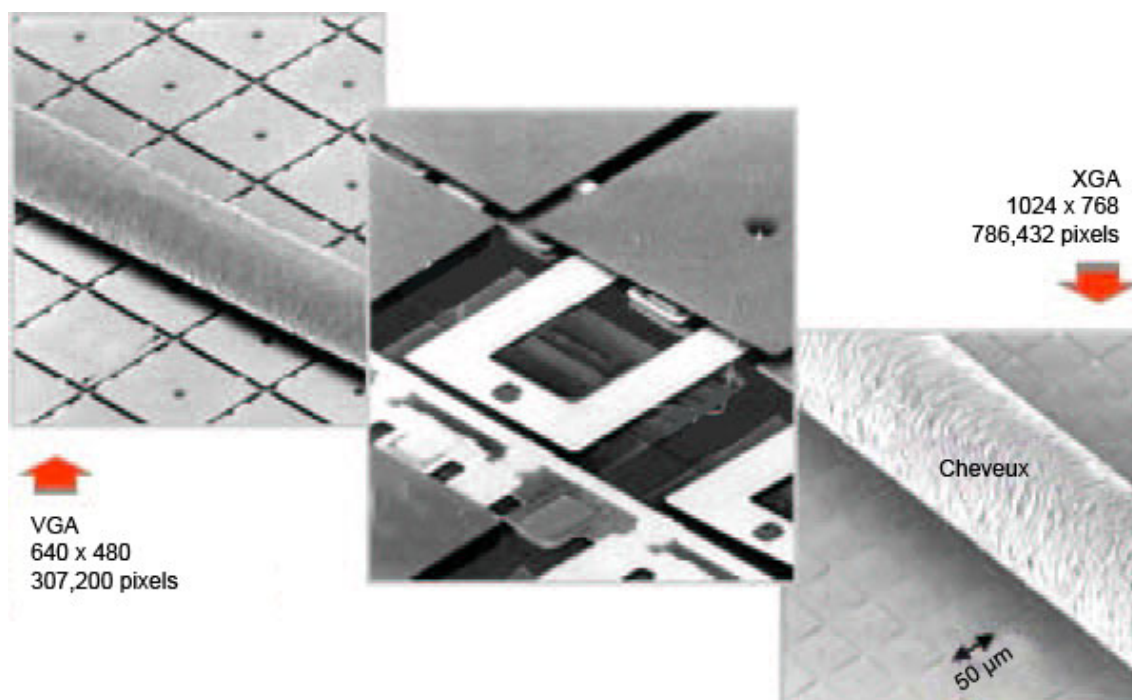


Figure 2

Les poutres sont attachées au substrat PMOS. Chaque poutre mono-encastree consiste en une couche de nitrure de silicium ( $\text{SiN}_x$ ) non stœchiométrique qui sert de support à une électrode inférieure en platine, une couche piézoélectrique et une électrode supérieure en platine. Lorsqu'on applique une tension entre les deux électrodes, la couche piézoélectrique se contracte dans la direction horizontale et se dilate dans la direction verticale. Il en résulte que la ligne neutre de la poutre se déplace vers l'électrode inférieure du fait de l'épaisseur de la couche support et la contraction mécanique de la couche piézoélectrique produit une déflexion verticale de la poutre vers le haut et par voie de conséquence l'inclinaison de miroir déposé dessus.

Les dispositifs à matrices de micro-miroirs en couches minces sont fabriqués en bloc sur des matrices PMOS active par des techniques de micro-usinage de surface. La matrice active est un réseau de transistors qui adressent le signal vidéo à chaque pixel. La taille de chacun des miroirs est de  $49\mu\text{m} \times 49\mu\text{m}$  pour des systèmes au format XGA.

Les couches miroirs sont en aluminium déposé par pulvérisation sur la couche sacrificielle supérieure. La couche d'aluminium est usinée par des techniques de gravure sèche pour réaliser la forme des miroirs. Les couches sacrificielles sont enlevées pour réaliser les gaps d'air nécessaires. Comme il est nécessaire d'utiliser deux matériaux différents pour ces couches, le procédé de dégagement se fait en deux étapes. Tout d'abord, la couche sacrificielle supérieure est dégagée au travers des ouvertures entre les miroirs par gravure plasma. Après le dégagement complet de cette couche, la couche sacrificielle inférieure se trouve exposée à l'air et est éliminée par un procédé de gravure à la vapeur de fluorure de xénon. Les deux techniques utilisées présentent des vitesses de gravure latérale élevées, ne laissent pas de résidus, ne gravent et n'endommagent pas les autres couches. L'image ci-dessus représente des clichés au microscope électronique de structures complétées par des matrices aux formats VGA et XGA après le processus de libération des couches sacrificielles. Les 800 000 miroirs finaux du dispositifs au format XGA présentent des positions d'inclinaison initiale de  $00,03^\circ$ .

Un prototype de projecteur opérationnel du 5 400 lumens avec trois systèmes à matrices de micro-miroirs en couches minces et une lampe au xénon de  $1kW$  avait été présenté au salon Asian Display 1998. Il offrait une efficacité globale de transmission de la lumière de 22%.

Les actionneurs à micro-poutre piézoélectriques encastrées des matrices de micro-miroirs en couches minces n'ont pas servi que pour l'affichage mais aussi pour le balayage rapide des matrices de sondes AFM et pour l'adaptation des contraintes mécaniques dans les dispositifs photoniques.

### 3.3. Le commutateur de lumière à réseau (GLV : Grating Light Valve)

Le GLV est une application spécifique des microsystemes qui fonctionne comme un réseau accordable dynamique pour faire varier avec précision la quantité de lumière laser qui est diffractée ou réfléchi. Le GLV est composée d'une série de rubans à la surface d'une plaquette de silicium comme le montre la figure ci-dessous. Ces rubans peuvent se déplacer vers le haut ou vers le bas sur de très petites distances en ajustant les forces électrostatiques entre les rubans et le substrat. Les rubans sont placés de telle sorte que chaque élément est capable soit de réfléchir soit de diffracter la lumière. Ceci permet à une matrice d'éléments, adressée de manière adéquate, de faire varier le niveau de la lumière réfléchi à la surface de la plaquette. Le contrôle de la lumière peut se faire de manière analogique (contrôle variable du niveau lumineux) ou digitale (commutation on/off). Du fait que les dispositifs GLV utilisent le principe de la diffraction pour commuter, atténuer et moduler la lumière, ils sont d'une très haute précision, faciles à fabriquer et peuvent éventuellement manipuler des faisceaux de puissance relativement élevée. Cependant, puisque la lumière projetée est obtenue par diffraction plutôt que par une réflexion directe, il y a inévitablement des pertes par rapport à la puissance incidente.

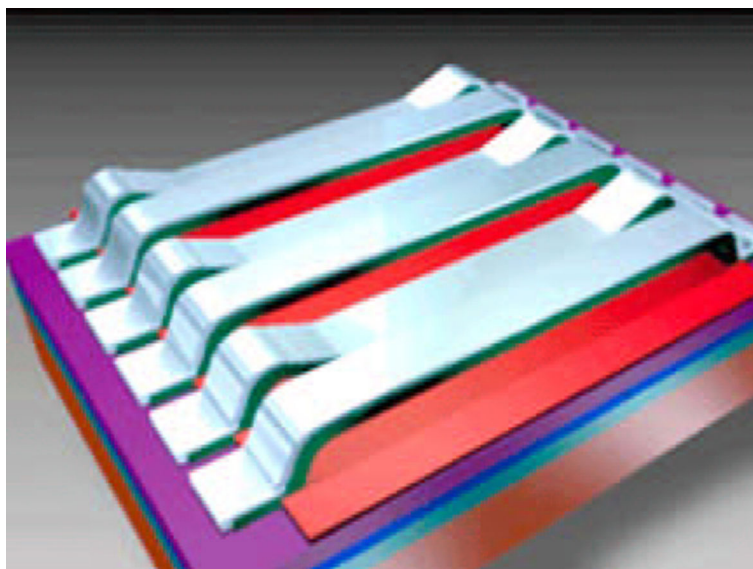


Figure 3

Chaque élément GLV se compose de six rubans parallèles suspendus aux deux extrémités et fabriqués sur du nitrure de silicium recouvert d'une couche métallique réfléchissante. Cette couche supérieure sert aussi d'électrode pour créer le champ électrostatique attracteur avec l'électrode inférieure commune à tous les rubans. Le temps de commutation on/off est de  $20ns$  ce qui est beaucoup plus rapide qu'avec les miroirs pivotants existants. Les dispositifs existants sont annoncés pour avoir une efficacité de diffraction proche du maximum théorique de 81%, un facteur de remplissage de 95% et un coefficient de réflexion de l'électrode supérieure de 91% avec une efficacité globale des dispositifs d'environ 70% correspondant à des pertes d'insertion de l'ordre de  $1,5dB$ .

Les écrans de projection de grande dimension ont été les premières applications ciblées par la technologie GLV. On a montré qu'un système de projection pour afficher une image TV haute définition 1920 x 1080 pixels pouvait être réalisé par balayage d'une matrice GLV linéaire de 1080 pixels. Cependant, du fait de la compétition commerciale entre les dispositifs DLP et LCD et à la guerre des prix qu'elle entraîne, le surcoût additionnel du système de balayage et l'effet speckle dû au faisceau laser ont conduit à un report de la commercialisation des écrans à GLV. Toutefois, l'accordabilité numérique du GLV a permis d'utiliser avec succès de nombreux dispositifs optique reconfigurables tels que des filtres accordables, des égaliseurs de gain dynamiques et des imprimantes à GLV.

### 3.4. Le polychromateur

Le polychromateur est un système de spectromètre à corrélation de champ d'obscurité, programmable électroniquement et basé sur un microsysteme optique composé d'un réseau de diffraction programmable. Ce dispositif a été mis au point dans le cadre d'une collaboration entre Honeywell, le MIT et Sandia National Lab. Plutôt que de servir de moyen de projection d'images, le polychromateur est un nouveau système de capteur capable de distinguer un grand nombre d'espèces gazeuses à distance en utilisant une combinaison de systèmes optiques et de MEMS. Ce dispositif autorise une sensibilité et une sélectivité suffisantes par détecter de très faibles quantités de gaz pour des applications en imagerie pour la biologie et la sécurité.

Le polychromateur n'a pas besoin de cellule de référence contrairement à de nombreuses techniques conventionnelles d'analyse de gaz. Pour ce faire, le spectre de référence pour chaque mesure est obtenu par modulation du réseau du polychromateur. Les dispositifs les plus récents consistent en des milliers d'éléments de faisceau mécaniques sur une plaquette de silicium. Les faisceaux et les actionneurs sont fabriqués par les techniques standard d'élaboration de couches minces. Chaque élément de réseau fait  $10\mu m$  de large et  $1cm$  de long et est conçu pour pouvoir se déplacer verticalement vers le haut ou vers le bas comme le montre l'image ci-dessous.

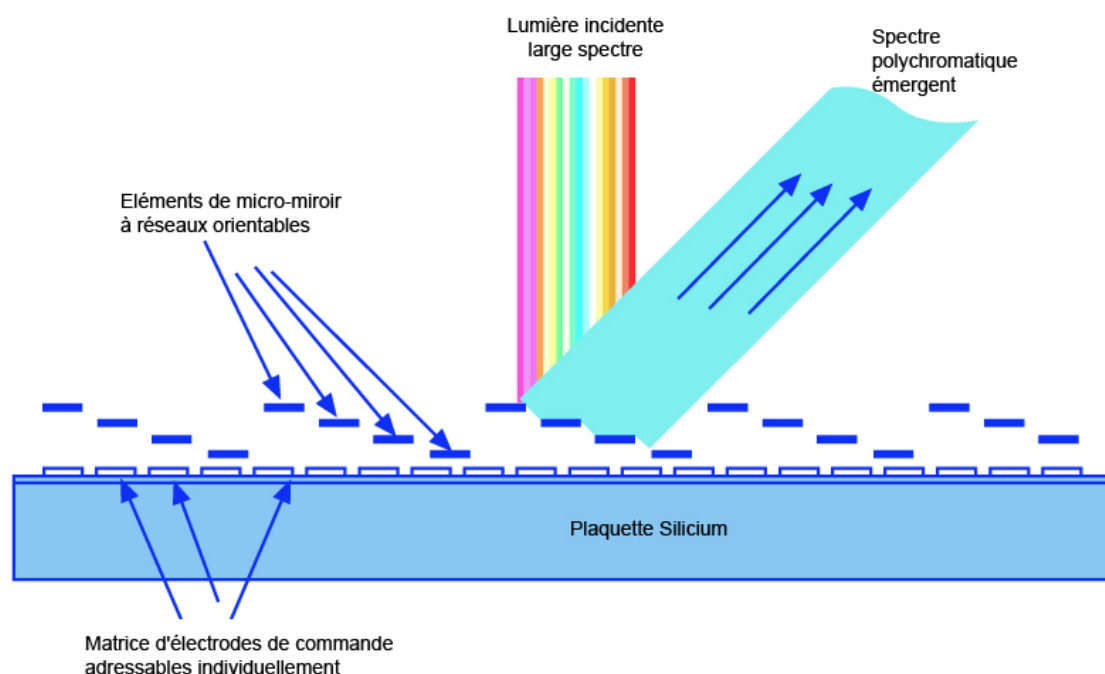


Figure 4

La lumière provenant de l'environnement (par exemple celle d'un nuage gazeux suspect) est dirigée vers le capteur après avoir été collectée par un « relais » optique tel qu'un télescope ou une lunette binoculaire. Le réseau est alors programmé pour accorder le spectre incident avec

un spectre de référence. C'est ainsi qu'on détermine si le nuage gazeux contient la substance avec laquelle le réseau était conçu pour s'accorder. Bien évidemment, la principale caractéristique du dispositif est sa capacité à être reconfiguré. Le polychromateur remplace ainsi toute une rangée de bonbonnes de gaz contenant les produits chimiques de référence et qui aurait dûes être utilisées pour mettre en œuvre une technique de spectrométrie par corrélation.

### 3.5. Bolomètres IR sans refroidissement

Les capteurs à infrarouge permettent l'identification et la représentation d'objets selon leur température d'émission. La possibilité de réaliser de l'imagerie thermique permet la mesure de température à distance et donne la possibilité de vision dans le noir, la fumée et par temps très couvert. Jusque récemment des caméras IR hautes performances nécessitaient de coûteux systèmes de refroidissement aux températures cryogéniques pour détecter les photons et éliminer le bruit thermique. Plus récemment, des capteurs fonctionnant à température ambiante ont été développés en utilisant des bolomètres micro-usinés et des détecteurs pyroélectriques. Des structures infrarouge FPA (focal plane array) peuvent réaliser des images infrarouges de scènes produites par des êtres humains ou des objets en transformant les changements de température induits sur les détecteurs en signaux électriques. Les bolomètres non refroidis utilisent les changements induits par la température dans la résistance électrique, la polarisation et les propriétés diélectriques des matériaux constituant les détecteurs.

Ces détecteurs nécessitent une grande isolation thermique avec le substrat pour obtenir une grande sensibilité. Les microtechnologies jouent un rôle essentiel pour permettre la fabrication de tels détecteurs de chaleur massique très faible avec une isolation thermique exceptionnellement élevée. Une matrice 2D de bolomètres résistifs avec structure isolante décrite sur l'image ci-dessous est commercialisée par Honeywell.

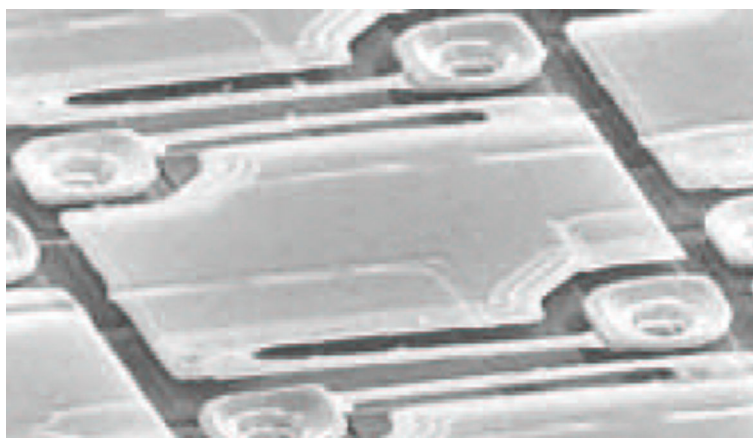


Figure 5

La membrane en nitrure de silicium est suspendue par deux bras au-dessus du substrat de silicium. La taille des bras de suspension est ajustée pour avoir une conductance thermique de  $8 \times 10^{-8} W/^{\circ}K$ . La chaleur massique de la plaquette est de  $8 \times 10^{-10} J/^{\circ}K$  et le temps de réponse en température est de  $10ms$ . En travaillant à 30 images par seconde avec une optique  $f/1$ , le NETD (noise equivalent temperature difference) a été mesuré à  $0,04^{\circ}C$  avec une résistance en oxyde de vanadium. Une autre alternative a consisté à développer une matrice monolithique 2D utilisant les propriétés pyroélectriques du titanate de plomb avec un système d'isolation thermique identique à celui développé chez Honeywell. Le NETD annoncé pour ce dispositif était de  $0,01^{\circ}C$  et il a été adopté pour plusieurs applications militaires.

Un dispositif à trois niveaux décrit sur l'image ci-dessous a été fabriqué par Kim et ses collègues.

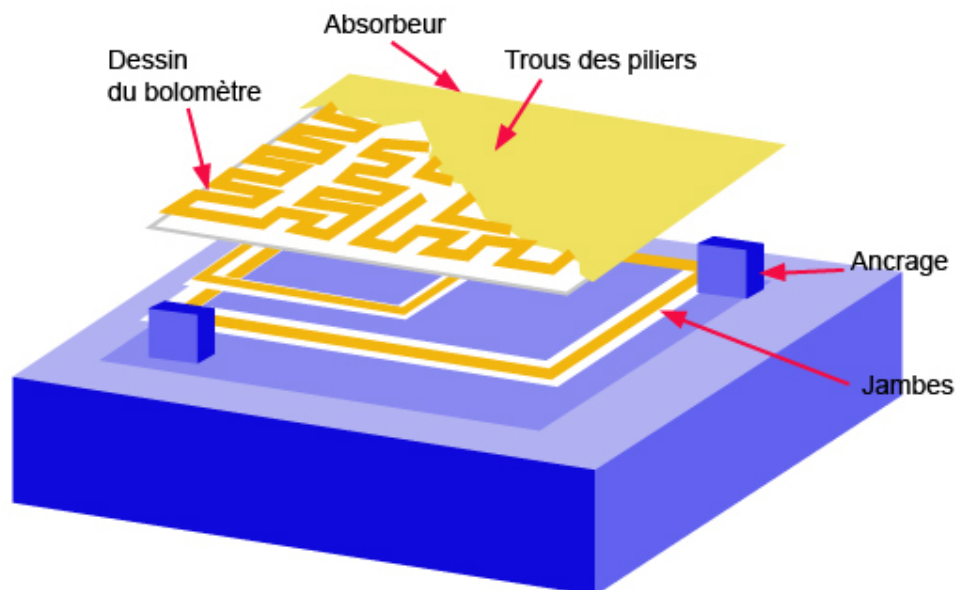


Figure 6

Les objectifs principaux de ce dispositif étaient d'accroître le facteur de remplissage (92% contre 62% pour le dispositif Honeywell) et de minimiser la conductance thermique, finalement analogue à celle du dispositif planaire d'Honeywell.

### 3.6. Les microsystèmes pour l'optique intégrée

Les microsystèmes optiques décrits dans les paragraphes précédents peuvent être considérés comme des systèmes optiques en espace libre puisque les structures mobiles (miroirs, réseaux, etc ...) interagissent avec la lumière lors de sa propagation dans l'air. A l'inverse, en optique intégrée, la lumière est confinée dans des guides d'ondes réalisés sur des matériaux optiques adéquats comme le montre l'image ci-dessous.

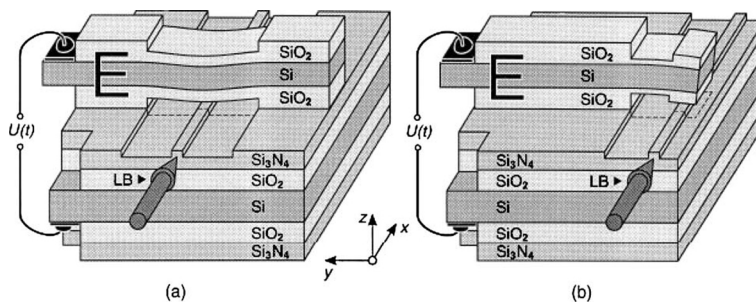


Figure 7

Dans ces cas, il est bien évidemment difficile de contrôler la propagation de la lumière avec des miroirs ou des réseaux de diffraction au contact direct avec le faisceau lumineux. Cependant il existe bien des moyens alternatifs pour contrôler la lumière par des structures mécaniques en optique intégrée. Ils sont basés sur le couplage par les ondes évanescentes entre la lumière guidée et des structures diélectriques telles que des ponts ou des poutres suspendus sur les guides d'ondes. Ces dispositifs sont basiquement des modulateurs de phase et ils fonctionnent en modifiant l'indice de réfraction effectif des guides et donc la vitesse de groupe de la lumière.

On peut par exemple réaliser un commutateur optique  $2 \times 2$  sur la base d'un interféromètre de Mach-Zehnder dans lequel le retard de phase est contrôlé par un microsystème qui utilise la modulation de la phase.

### 3.7. Les cavités laser Fabry-Pérot accordables

La possibilité de nano-positionnement est essentielle pour des applications telles que les cavités laser accordables pour lesquelles les dimensions spécifiques sont de l'ordre de la longueur d'onde laser. Cette nécessité a permis un mariage réussi entre les capacités de nanositionnement des MEMS et la technologie des VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser). Les VCSEL ont été inventés à la fin des années 1980 comme des moyens pour obtenir des lasers solides pour émettre de la lumière verticalement par rapport à un substrat ce qui est préférable pour un grand nombre d'applications en éclairage, interconnexions optiques, etc...

Dans les structures initiales, le miroir supérieur du VCSEL était un réflecteur de Bragg distribué (DBR Distributed Bragg Reflector). Dans la configuration microsysteme décrite par l'image ci-dessous et datée de 1995, le réflecteur est lié à une structure poutre encastrée mobile qui est capable d'accorder la longueur d'onde de résonance jusqu'à  $15nm$  avec une tension de commande faible d'approximativement 5 à 7V.

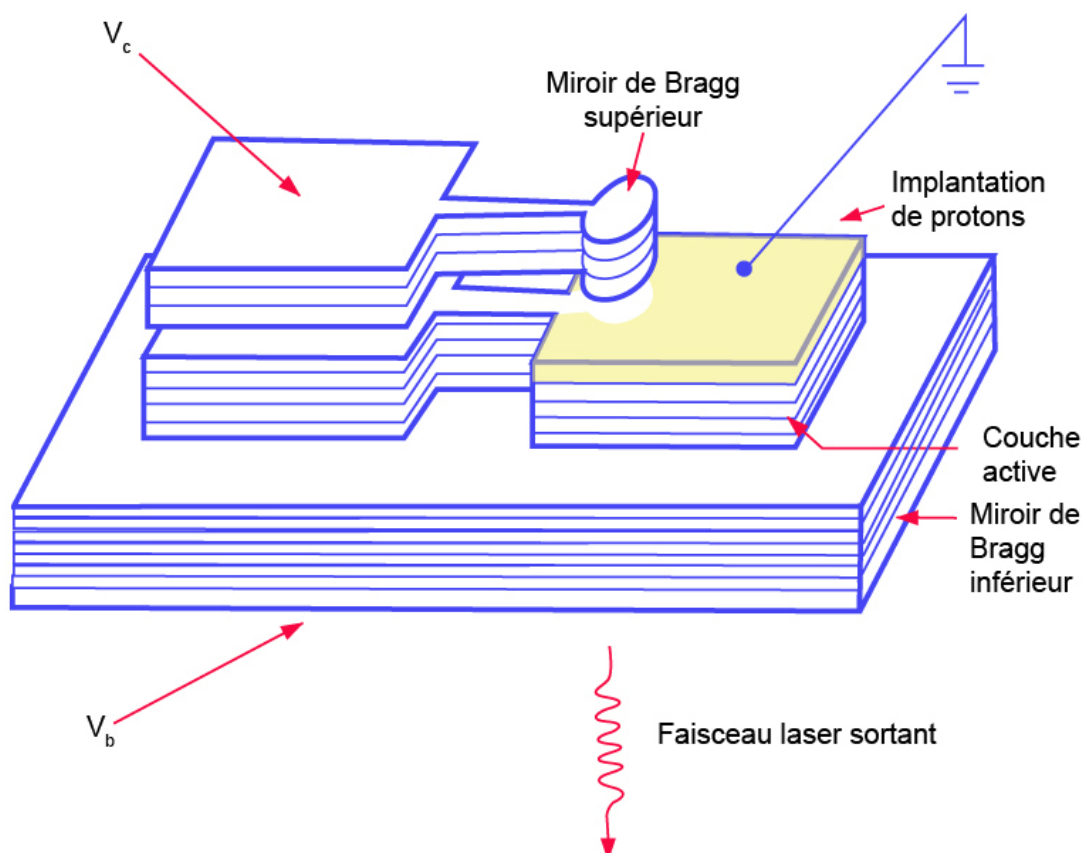


Figure 8

Depuis ces premières réalisations, l'accordabilité a été améliorée pour couvrir toute la gamme  $1530 - 1620nm$  des longueurs d'onde des communications DWDM.

### 3.8. Dispositifs optiques à contraintes accordables

Les réseaux accordables tels que les GLV ou le polychromateur peuvent être décrits comme numériques ou digitaux parce que l'actionnement résulte d'un changement de la période du réseau et d'une modulation de son profil par quantités discrètes, égales à la taille des rubans micro-usinés. Dès lors, la « reconfigurabilité » est limitée par la plus petite dimension permise par le processus de lithographie. Pour ouvrir des possibilités à de très petite échelles, il a été nécessaire développer une nouvelle classe de réseaux accordables « analogiques ». Le nano-positionnement est une possibilité fonctionnelle additionnelle offerte par ces dispositifs, celle-ci

est nécessaire pour permettre une reconfiguration suffisamment précise pour les applications optiques. Toutefois un autre aspect est sacrifié parce que ces dispositifs analogiques sont inadaptés par exemple pour réaliser les fonctions du polychromateur dans un spectromètre à corrélation.

Le balayage analogique d'un réseau de diffraction est obtenu par un actionnement transversal de la structure du réseau en utilisant un actionneur en couche mince piézoélectrique ou un peigne d'électrodes avec des réseaux repliés comme les décrivent l'image ci-dessous.

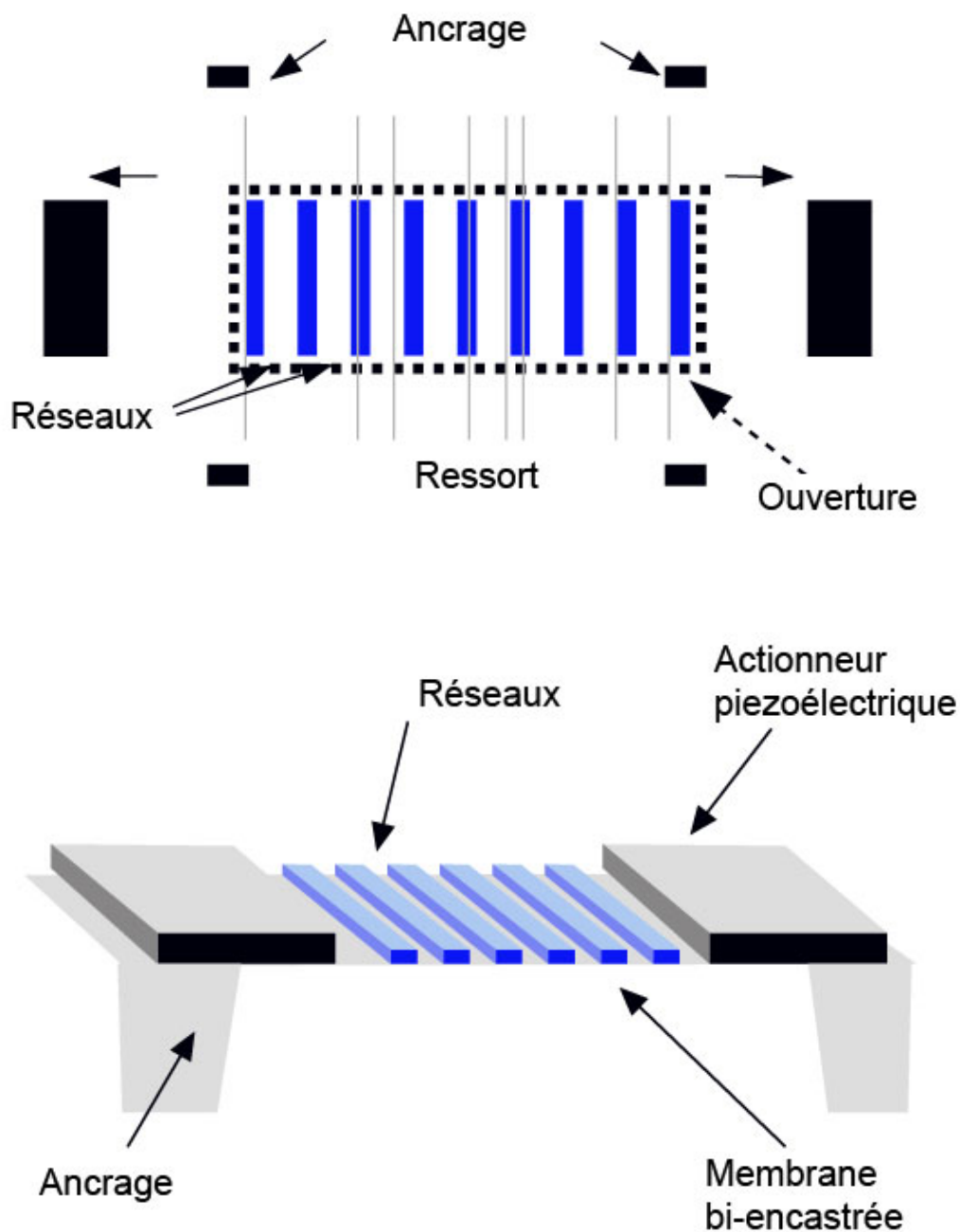


Figure 9

Afin d'obtenir le mouvement transversal, les gravures du réseau sont réalisées sur une membrane déformable en suspension. La membrane est tendue mécaniquement par les

actionneurs piézoélectriques en couches minces réalisés avec une couche de titanate et zirconate de plomb en sandwich entre deux électrodes supérieure et inférieure situées aux deux extrémités de la membrane. Ces actionneurs piézoélectriques sont capables de produire une force suffisante pour étirer la membrane jusqu'à une contrainte de  $0,3\%$  ou de manière équivalente jusqu'à produire une variation de  $0,3\%$  de l'angle diffracté sous l'action d'un champ électrique en travers de la couche piézoélectrique. La contraction de la couche piézoélectrique entraîne une contrainte mécanique sur la membrane dans la direction transversale.

Compte-tenu de la possibilité d'un contrôle très précis de la tension appliquée sur une couche mince piézoélectrique, il est possible d'obtenir une résolution meilleure que  $0,05nm$  dans les variations de la période du réseau correspondant à une résolution angulaire meilleure que  $2,1\mu rad$ ; alors même que les possibilités actuelles de la métrologie ne permettent pas une résolution observable inférieure au nanomètre. Les pivotements et torsions de la membrane en dehors du plan d'équilibre, les rotations asymétriques pendant l'actionnement, les perturbations thermiques, les vibrations et les techniques de détection optique peuvent limiter la résolution la plus fine atteignable. La démonstration de réseaux de diffraction accordables a permis d'observer l'accordabilité de l'angle de diffraction du 1er ordre jusqu'à  $486\mu rad$  sous  $10V$  avec des déplacements minimaux observables de la période du réseau d'environ  $0,6nm$  sous  $1V$ .

La reconfigurabilité combinée avec le nano-positionnement conduit à des possibilités d'applications intéressantes pour les dispositifs à réseaux accordables.

### Exemple

Par exemple, des réseaux accordables ultra-précis peuvent permettre de compenser les dérives thermiques en longueur d'onde dans des réseaux de communications optiques sensibles aux variations de température tels que des multiplexeurs/démultiplexeurs ou des routeurs.

### Remarque : Le concept de « diversité optique »

On peut aussi noter qu'il est possible de réaliser des matrices de dispositifs à réseaux de diffraction, et en particulier avec les dispositifs piézoélectriques dans lesquels les actionneurs n'occupent qu'une petite place comparativement aux dispositifs électrostatiques.

C'est une autre possibilité intéressante qui a été développée pour compenser la limitation de l'ouverture des spectromètres à réseaux. Pour résumer, on peut poser le problème de la manière suivante : la résolution spectrale d'un spectromètre à réseau est déterminée par le nombre de périodes  $N$  du réseau. D'où, comme la surface accessible dans un spectromètre miniature est petite (par définition), le spectre obtenu peut être flou. En d'autres termes, la valeur mesurée de la densité spectrale à une longueur d'onde donnée ne correspond pas à la valeur réelle de l'échantillon testé mais elle contient aussi des contributions des autres longueurs d'onde voisines (c'est le phénomène de convolution). Il est bien entendu possible de remonter à la densité spectrale réelle par une opération de déconvolution connaissant la réponse impulsionnelle du réseau qui dépend de  $N$  et la réponse impulsionnelle de l'optique de collection de la lumière. Cette déconvolution peut être réalisée numériquement par un post-traitement du spectre mesuré. Cependant l'opération de déconvolution est très sensible au bruit inhérent à toute mesure. On a découvert que, en balayant le réseau et en répétant la mesure spectrale, on pouvait récupérer le spectre flou avec une sensibilité bien plus faible au bruit et par conséquent une bien meilleure définition.

La diversité optique fonctionne de la manière suivante : la période du réseau est d'abord fixée à une valeur initiale et une première mesure floue est faite. Le réseau est ensuite actionné de telle sorte que sa période change d'une petite quantité et une seconde mesure floue est faite. Ce processus est répété en fonction du niveau de bruit observé. Plus le rapport signal sur bruit est faible, plus le nombre de mesures nécessaires est grand. L'ensemble des spectres flous récoltés est ensuite traité en utilisant une classe d'opérations mathématiques appelée « régularisations pseudo-inverses ». Après cette étape, on obtient le spectre final « dé-flouté ». La qualité du processus de traitement du signal est liée au niveau du bruit de mesure et à la

précision et la définition de l'actionnement des réseaux. Il ressort que la diversité optique est un bon exemple pour montrer comment la reconfiguration et le nano-positionnement peuvent aider à résoudre un problème optique important dû à la miniaturisation des spectromètres.

## 4. Quels matériaux pour quelles applications ?

### 4.1. Rappel

Nous avons pu voir que le micro-usinage rend possible la fabrication de structures miniatures mobiles idéalement adaptées pour des applications dans le domaine optique. De faibles déplacements, par exemple d'un quart de longueur d'onde dans un interféromètre, peuvent produire une commutation on/off ou créer des effets de modulations plus importants que dans des dispositifs électro-optiques ou électroniques conventionnels. De même, nous avons vu que les réseaux de micro-miroirs peuvent servir de base pour des systèmes d'écran d'affichage ou bien pour des routeurs optiques.

#### *Exemple*

- les rugosités de surface déterminent la réflectivité des miroirs
- les contraintes mécaniques sur les membranes créent des distorsions dans les images réfléchies
- les guides d'ondes intégrés dans les microsystèmes optiques doivent avoir des indices de réfraction et des pertes optiques reproductibles
- les actionneurs, qu'ils soient électrostatiques, piézoélectriques ou thermo-mécaniques, doivent avoir des tensions d'activation et une dissipation d'énergie faibles tout en assurant un fonctionnement reproductible sur un grand nombre de cycles de fonctionnement.

Les matériaux choisis et les techniques de fabrication ont donc une importance toute particulière.

### 4.2. L'exemple des systèmes de projection à DMD

Si on prend l'exemple des systèmes de projection à DMD développés par Texas Instruments, on s'aperçoit que plutôt que d'utiliser un procédé conventionnel de micro-usinage de surface utilisant un verre de phosphosilicate pour la couche sacrificielle et du silicium polycristallin pour les éléments micro-mécaniques, on a développé un procédé à basse température utilisant une résine positive conventionnelle et des alliages d'aluminium déposés par pulvérisation. Ce procédé a rendu possible la fabrication de toutes les sous-couches électroniques des composants micro-mécaniques sous les micro-miroirs permettant ainsi d'avoir un facteur de remplissage élevé et de petits gaps d'air sous les micro-miroirs.

Afin d'assurer une haute fiabilité, on a porté une attention particulière pour diminuer les pincements entre les parties en contact notamment. Pour cela, une monocouche autoassemblée de lubrifiant est appliquée pour diminuer les forces d'adhérence. De plus, un rétro-contrôle électronique est utilisé pour piloter et contrôler le mouvement des micro-miroirs pour éviter les « coups de boutoir » et les oscillations. Un alliage d'aluminium spécifique a été développé pour minimiser les dérives angulaires des micro-miroirs dans le temps.

Si on réalise que ces dispositifs contiennent plus d'un million d'éléments micro-mécaniques et que l'œil humain est à même de détecter à la lecture un petit nombre de pixels défectueux sur un écran, on comprend pourquoi le « packaging » a dû être réalisé dans des salles blanches de classe 10 au lieu de 10 000 pour éliminer les défauts dus aux particules étrangères aux dispositifs.

Les micro-poutres encastrées, les membranes et les micro-ponts sont souvent soumis à des contraintes, en particulier lorsque des couches minces sont déposées à leur surface. Ces contraintes peuvent avoir une origine intrinsèque (par exemple des désaccords de maille) ou être dues à des effets thermomécaniques liés aux valeurs différentes des coefficients de dilatation thermique des matériaux. Elles conduisent souvent à des déformations structurales en dehors du plan du miroir avec des angles imprévisibles.

### Exemple

Des chercheurs ont proposé un commutateur optique  $2 \times 2$  basé sur une micro-poutre encastrée en silicium polycristallin avec un micro-miroir pivotant qui est placé dans sa position normale hors du plan à cause d'une couche mince d'alliage chrome-or qui met le silicium polycristallin dans un état de compression. Le commutateur est actionné en appliquant une tension entre la poutre et le substrat de telle sorte que le micro-miroir se place sur le trajet de la lumière.

Les micro-miroirs utilisés pour les routeurs en télécommunications sont typiquement recouverts d'or qui a des propriétés réfléchissantes excellentes dans l'infra-rouge. Cependant on doit veiller avec grand soin à éviter de polluer avec l'or les dispositifs électroniques sur silicium intégrés dans les structures.

On utilise souvent du nitrure de silicium pour fabriquer des guides d'ondes optiques par différentes techniques y compris par pulvérisation, CVD, PECVD et LPCVD. A la fois la technique utilisée et les conditions précises du processus contribuent aux variations d'indice de réfraction, aux pertes optiques et à l'amplitude et à la nature des contraintes résiduelles. Par exemple, en utilisant la PECVD on peut obtenir des indices de réfraction compris entre 1,9 et 2,2 avec des contraintes variables en compression ou en tension selon le ratio atomique Si/N et les conditions de dépôt. D'où il ressort que le choix des matériaux et des conditions de mise en œuvre doit être fait avec toute l'attention nécessaire pour assurer des structures stables et reproductibles.

## 4.3. Autres Exemples

En plus des matériaux optiques passifs tels que le  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , et en fonction des applications, il s'avère intéressant d'utiliser des matériaux actifs tels que les matériaux électro-optiques ou magnéto-optiques pour la modulation optique, les matériaux pyroélectriques pour les capteurs IR ou les matériaux fluorescents pour réaliser des sources. La majorité de ces matériaux actifs intéressants sont des oxydes complexes, souvent avec des structures pérovskites ou grenat et qui, normalement, à l'état solide massif, nécessitent d'être portés à de très hautes températures pour obtenir la pureté de phase ou les microstructures désirées. Afin de rendre possible leur intégration dans des structures de la microélectronique à base de silicium ou sur des dispositifs micro-mécaniques, ces matériaux sont élaborés sous la forme de couches minces soit par des techniques de dépôt en phase vapeur (par exemple par pulvérisation, PLD, MOCVD, MBE) ou bien par des méthodes chimiques (par exemple sol-gel). En général, le degré de cristallinité, l'orientation, la micro-structuration, la stœchiométrie et les contraintes intrinsèques dépendent sensiblement des conditions de dépôt, de la nature et de la température du substrat. D'où il ressort qu'en général, les films réalisés présentent une activité réduite par rapport au matériau massif correspondant. Par exemple, un modulateur électro-optique obtenu en déposant un film de  $\text{BaTiO}_3$  sur un substrat monocristallin en  $\text{MgO}$  présente un coefficient électro optique effectif de  $50 \text{ pm/V}$ , moins d'un ordre de grandeur plus faible que la valeur mesurée pour le monocristal. On observe un phénomène analogue pour les propriétés piézoélectriques. Ces phénomènes sont supposés être dus aux effets de contraintes imposées par le substrat, par les défauts et au niveau des interfaces. Les couches tampons, entre le silicium et les oxydes actifs, jouent un rôle essentiel pour éviter l'interdiffusion et l'oxydation mais elles servent aussi de couches « germes » pour aider à la nucléation des phases et des orientations cristallographiques appropriées. On peut trouver une excellente revue détaillée de bon nombre de ces problèmes dans un article signé par P. Muralt en 2000 (Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol 10, p 136).

#### **4.4. Perspectives**

Comme nous l'avons déjà mentionné en introduction, la seule miniaturisation ne suffit pas pour créer de nouveaux débouchés pour les microsystemes optiques. La collection de dispositifs présentée dans ce cours ne se voulait pas exhaustive mais plutôt indicative des possibilités offertes par les nouvelles fonctionnalités telles que la mise en réseau, la reconfigurabilité et le nanositionnement. Les futures technologies de l'information nécessitent des réseaux de communication toujours plus rapides et plus intelligents que l'on ne pourra obtenir qu'avec des systemes "tout optiques" et avec des fonctionnalités optiques plus sophistiquées telles que le traitement du signal optique intelligent ou l'optique adaptative.

# Signification des abréviations

- MEMS                    Micro-Electro-Mechanical Systems
- MOEMS                Micro-Optical-Electro-Mechanical Systems

# Bibliographie

[Les microsystemes] TABELING P., *Les microsystemes*, Revue de la SFP, 2001Juin-.

[MEMS : fabrication, design and applications] JUDY J.W. -, *MEMS : fabrication, design and applications*, Journal of Smart Materials and Structures, ---.

[MEMS for optical functionality] KIM S. ET AL -, *MEMS for optical functionality*, Journal of Electroceramics, 2004--.

# Webographie

[-] <http://www.ti.com> (consultation 27 07 2007).