

Introduction à la Micro-Optique

ALAIN TROUILLET

Table des matières

I. Présentation	3
II. Cours	4
1. Introduction.....	4
2. Avantages des microsystemes.....	5
3. Origine des microsystemes optiques.....	6
4. Les principales catégories de microsystemes optiques.....	10
5. Techniques et procédés de fabrication.....	11
5.1. Les méthodes de micro-usinage.....	17
5.2. Le micro-usinage de surface.....	20
5.3. L'auto-assemblage des MOEMS.....	23
5.4. Autre procédé de micro-usinage : l'ablation laser.....	23
6. Caractérisation des microsystemes par la mesure optique.....	24
7. L'interaction de la lumière avec les micro-structures.....	25
8. Bibliographie.....	30
III. Etude de cas : les micro-miroirs orientables	31
1. Origine et évolutions.....	33
2. La fabrication.....	38
3. Analyse du fonctionnement.....	41
IV. Exercices	45
1. Test de connaissance.....	45
Solution des exercices	46
Signification des abréviations	48
Bibliographie	49
Webographie	51

I.Présentation

Module :

Optique des rayons X

Auteur(s) :

Alain TROUILLET - Université Jean Monnet Saint-Étienne

Résumé :

Ce cours consiste en une présentation descriptive de l'histoire, des principaux concepts de bases et des principales technologies de fabrication des microsystèmes optiques.

Mots-clés :

Microsystèmes optiques, Micro-optique, MOEMS

Pré-requis :

Connaissances de base en optique, interférences et diffraction.

Objectif(s) pédagogique(s) :

Connaître les concepts physiques, les caractéristiques principales et les potentialités d'application des microsystèmes optiques

Plan du cours :

- Introduction
- Avantages des microsystèmes
- Origine des microsystèmes optiques
- Les principales catégories de microsystèmes optiques
- Techniques et procédés de fabrication
- Caractérisation des microsystèmes par la mesure optique
- L'interaction de la lumière avec les micro-structures
- Bibliographie

Conception & production :

PRN - Le Mans Université

Licence :

Licence GNU¹

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

II. Cours

1. Introduction

Les Microsystèmes Opto-Electro-Mécaniques (MOEMS) sont des systèmes de la taille du micron qui comprennent à la fois des micro-capteurs (incluant éventuellement des fonctions optiques) et des micro-actionneurs. Ils ont donc à la fois la possibilité de percevoir l'état du système et de son environnement, et de réagir à des modifications de cet environnement, à l'aide d'un micro-circuit de contrôle. Ces systèmes peuvent comprendre en plus de la microélectronique conventionnelle, des structures intégrant des mécanismes, des antennes pour l'échange d'information, des éléments optiques et parfois des systèmes de commande, des microsystèmes de puissance, des micro-relais, des microsystèmes de traitement du signal, des sources lumineuses et des détecteurs. Les MOEMS★ (et les MEMS★ dont ils sont issus) comprennent donc des mécanismes mis en mouvement de façon contrôlable.

Les microsystèmes connaissent et vont connaître un développement considérable de part leurs applications qui intéressent de nombreux secteurs de l'activité industrielle (télécommunications, aéronautique, spatial, biomédical, génétique, automobile, domotique, ...). Leur conception et leur mise en oeuvre, font appel à la fois aux concepts les plus fondamentaux de la physique, de l'électronique (composants et circuits), de la microélectronique, ... et les techniques utilisées permettent de réaliser de nouvelles fonctions en mécanique, chimie, biologie, acoustique, fluide, ...

Le microsystème, objet très intégré (donc faiblement observable) présente une forte valeur ajoutée. Ceci induit la nécessité d'une modélisation pluridisciplinaire de nombreux phénomènes (mécanique, électronique, matériaux, ...) qui représentent divers domaines connexes à la conception des microsystèmes dans le but de garantir avant la fabrication, la fonctionnalité de l'objet.

L'approche actuelle utilisée pour la conception des microsystèmes est basée sur la définition de différents niveaux de travail et des liaisons nécessaires entre eux. On distingue :

- le niveau mathématique/mécanique, qui permet d'effectuer différents calculs des structures, grâce notamment à des méthodes de calcul par éléments finis;
- le modèle physique, qui donnera naissance à l'architecture de la structure;
- le modèle de simulation paramétrable, intégré par exemple en langage VHDL/AMS.

Les microsystèmes sont obtenus à partir des techniques de photolithographie issues de la microélectronique (cf Partie 6).

Leurs applications sont plus larges que la microélectronique : mécanique, électromagnétisme, quantique, fluide, thermique, ... , biopuces, lab-on-chip, optique, nouveaux capteurs, ...

Définition : Microsystème

Combinaison de capteurs, d'actionneurs et des circuits associés éventuels, idéalement intégrés pour réaliser des fonctions plus ou complexes.

Un microsystème convertit un signal d'entrée physique (rayonnement, thermique, magnétique, mécanique, ...) ou chimique (concentration, ...) en un signal électrique pour être ensuite traité et transformé sous la forme exploitable désirée.

Ainsi on parle de **MEMS★** : « **Micro-Electro-Mechanical Systems** »

- Micro : échelle du micron
- Electro : présence de circuits et dispositifs électriques
- Mechanical : présence de structures et dispositifs mécaniques

avec des exemples de réalisations bien connues : accéléromètre d'airbag, tête d'imprimante jet d'encre, tête de lecture/écriture pour le stockage des données sur des supports magnétiques, ...

Puis de **MOEMS★** : « **Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems** »

ou encore : « **Optical- MEMS** »

- Opto ou optical : couplage des éléments précédents avec des dispositifs et phénomènes optiques

Il s'agit alors de microsystèmes dont les applications et les composants relèvent essentiellement du domaine de l'optique ou de la photonique avec des exemples de réalisations bien connues : miroirs, commutateurs, connecteurs, modulateurs optiques, multiplexeurs-démultiplexeurs en longueur d'onde, ... pour tendre vers des capteurs intelligents (smart sensors) et des actionneurs dotés de caractéristiques supplémentaires comme l'auto-test ou l'autocalibration.

L'objectif de ce cours est donc une introduction à l'origine et aux principales caractéristiques des microsystèmes optiques. Les principales technologies de fabrication seront aussi présentées.

2. Avantages des microsystèmes

La question est de savoir pourquoi nous voulons miniaturiser certains objets ?

Pour limiter l'encombrement,



Image 01

Exemple

On peut comparer la taille d'un accéléromètre d'airbag de 1980 : carte de 50cm^2 avec celle du même objet en 1995 : puce de 16mm^2 puis avec celle de l'accéléromètre de 2002 : puce de 3mm^2

1980 : carte 50 cm²

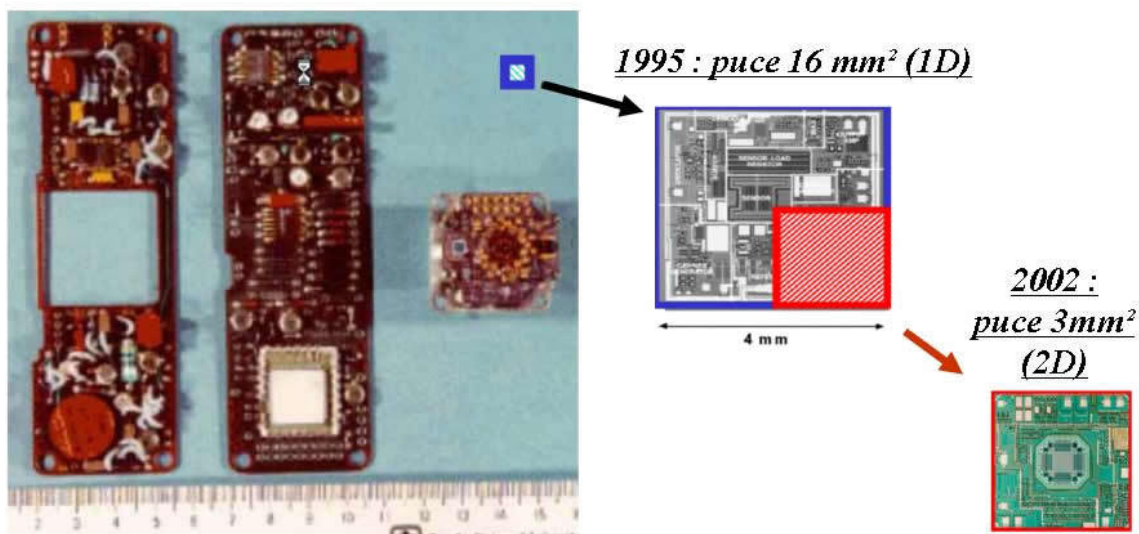


Image 02

Mais pas seulement ...

- les MOEMS★ requièrent des forces mécaniques très faibles;
- les phénomènes optiques requièrent de très petits déplacements $-\lambda/4$;
- la compatibilité avec les circuits intégrés : par l'utilisation du silicium notamment,
- la miniaturisation autorise l'intégration de la source, de la détection, du traitement de l'information et du conditionnement sur une même puce compatible avec les circuits intégrés; la miniaturisation permet de réaliser des réseaux de capteurs ou de détecteurs;
- la faible distance entre les éléments qui permet la réduction des effets capacitifs et l'utilisation des longueurs d'onde optiques permettent à la fois la réduction des temps de réponse et l'accroissement des bandes passantes;
- la réduction des coûts de fabrication : l'utilisation des technologies issues de la microélectronique permet une fabrication collective (en parallèle à partir d'un même wafer), l'intégration de plusieurs fonctions sur une même puce et la reproduction d'un dispositif à des millions d'exemplaires à un coût moindre;
- l'amélioration de la résistance mécanique du fait de fréquences de résonance très élevées et de l'utilisation dans de nombreux cas de silicium monocristallin.

Quelques inconvénients cependant :

- les problèmes de bruit et d'amplification du bruit;
- des coûts de développement très élevés;
- les limites de la physique à une miniaturisation toujours plus poussée.

3. Origine des microsystèmes optiques

Introduction

Les microsystèmes optiques se trouvent au croisement de trois grands domaines :

- la micro-mécanique;
- la micro-électronique;
- l'optique / photonique.

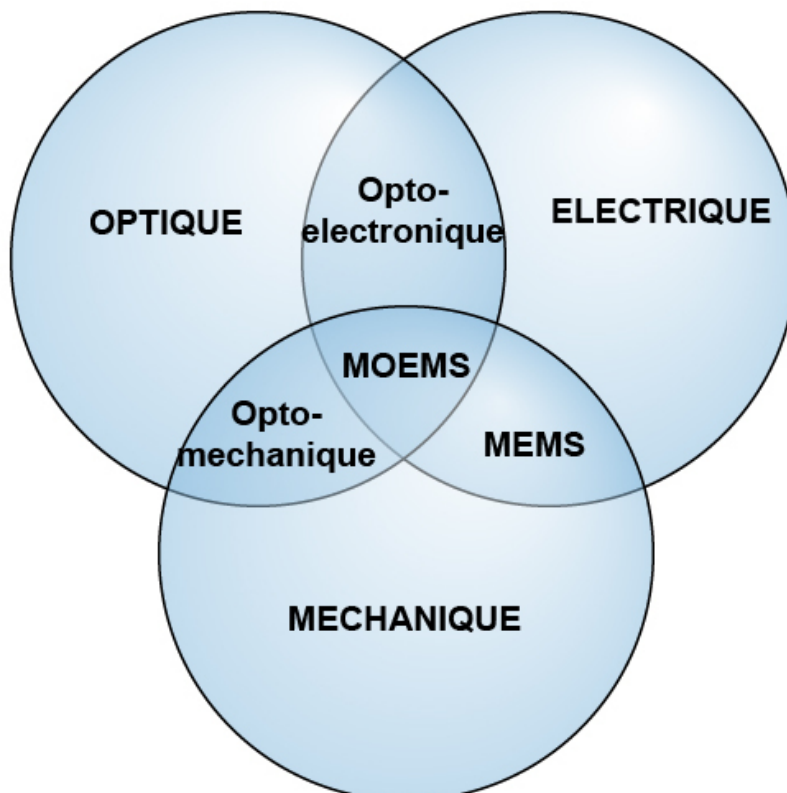


Image 03 - Les trois grands domaines des microsystèmes optiques

La micro-mécanique est très ancienne, elle remonte au XIV^{ème} siècle. Elle provient de l'industrie horlogère et de sa miniaturisation pour réaliser des montres (réalisation de micro-engrenages et de micro-actionneurs). Mais la miniaturisation à l'extrême implique toujours plus de nouvelles technologies qui soulèvent alors toujours plus de problèmes, comme par exemple :

- la théorie de la mécanique est-elle encore valable ?
- l'inertie : masses ultra-faibles (composants de surface), mises en mouvement instantanées des composants;
- la prédominance des forces électrostatiques sur les effets magnétiques alors que c'est le contraire à l'échelle macroscopique;
- la compensation des variations de température.

La réalisation de micro-machines repose sur la fabrication de structures micro-mécaniques à l'aide de techniques de gravure pour enlever une partie du substrat ou de couches fines. Cela se complique rapidement lorsqu'on souhaite réaliser des dispositifs avec des empilements structuraux.

Le silicium (Si★) constitue un matériau d'exception pour ces micro-structures. Sa masse volumique est très importante : $2,4 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et son module d'Young est élevé 1,3 à $1,7 \cdot 10^{11}$ Pa. On va voir ci-après que ces caractéristiques importantes pour des réalisations en micro-mécanique vont s'associer avec celles de la microélectronique.

Quelques dates :

- 1962 : première membrane à haute sensibilité en silicium pour réaliser un capteur de pression;
- 1970 : gravure isotrope du silicium suivant les axes cristallins pour réaliser ces membranes;
- 1976 : gravure anisotrope;
- 1980 : les premiers MEMS★;
- 1990 : diversification de ces dispositifs pour la chimie, la biologie, la microfluidique et le biomédical.

Les technologies vont bénéficier de ce que l'on pourrait appeler quatre révolutions.

Première révolution technologique : celle de la microélectronique.

C'est la première et la plus importante. Dans la seconde partie des années 1930, les laboratoires Telephone Bell envisagent de remplacer en téléphonie les commutateurs (*switch*) mécaniques par des commutateurs électroniques. Deux matériaux semi-conducteurs vont alors être principalement utilisés : le silicium (Si★) et le germanium (Ge★) qui présentent des valeurs de bandes interdites (band gap) de $1,11eV$ pour le silicium et de $0,67eV$ pour le germanium.

Le silicium va révolutionner la technologie pour aboutir aux circuits intégrés, notamment parce qu'il propose une valeur de bande interdite plus élevée. Toutefois le germanium n'est pas pour autant abandonné notamment parce qu'il est transparent aux longueurs d'onde des télécommunications (autour de $1550nm$) et pas le silicium.

Trois découvertes ont rendu cette révolution possible :

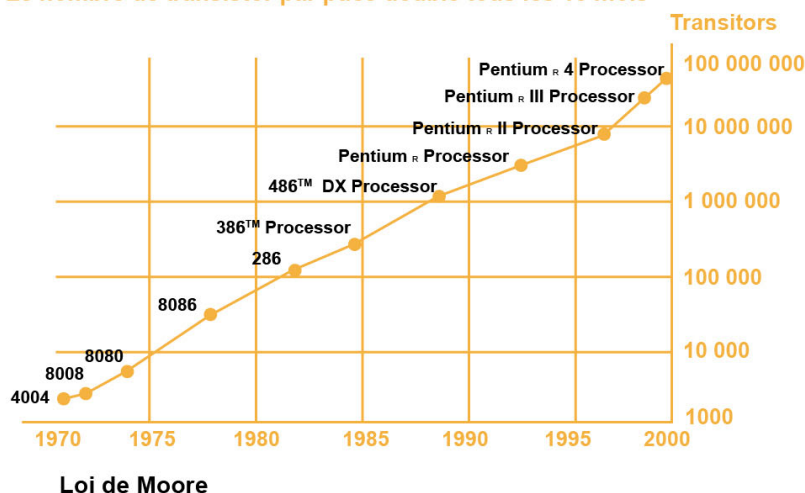
- la découverte de l'effet transistor (pour transfer resistor) avec les matériaux semi-conducteurs en 1947 par William Schockley, Walter Brattain et John Bardeen (prix Nobel 1956);
- le développement de la technologie du transistor planaire en 1959 par Bob Noyce (co-fondateur d'Intel);
- L'invention du premier circuit intégré (CI★) en 1959 chez Texas Instruments par Jack Kilby (prix Nobel 2000).

En 1959 toujours, Bell annonce le premier *Metal Oxyde Silicon* transistor (MOS★) par opposition aux technologies bipolaires. C'est la version intégrée du transistor.

En 1960, l'industrialisation des circuits intégrés débute au Japon avec Hitachi et Toshiba ainsi qu'aux Etats-Unis avec Motorola.

En 1965, Gordon Moore observe que le nombre de transistors intégrés sur une plaquette de silicium doublait chaque année, observation bientôt révisée à 18 mois et il décrit la courbe que l'on baptise loi de Moore qui prédit que la taille moyenne d'un transistor devrait descendre à $100nm$ en 2005 pour atteindre $35nm$ en 2014.

Le nombre de transistor par puce double tous les 18 mois



Evolution de la Loi de Moore

100 nm 2005
 70 nm 2008
 50 nm 2011
 35 nm 2014

↓ Nanotechnologies

Image 04 - Moore's Law (1964)

Une telle évolution ne pourra pas continuer éternellement parce que si les composants atteignent les tailles atomiques, les lois de la physique changent et les technologies ne sont plus adaptées.

A ce moment là, il n'y pas de solution connue pour remplacer le silicium.

Deuxième révolution technologique : celle des RF et des technologies sans fil

Où les communications deviennent portables et sans fil.

Les origines remontent à 1901 et aux travaux de Marconi sur les radiofréquences RF★ (prix Nobel 1908) mais les développements des technologies sans fil (*wireless*) sont beaucoup plus récents.

Ces dispositifs nécessitent des dispositifs de faibles dimensions alliés à de très faibles coûts de production.

Troisième révolution technologique : celle de la photonique

Elle correspond au développement des télécommunications par fibres optiques.

En 1970, Corning Glass a mis au point les premières fibres très transparentes. A la même époque, Bell Labs mettaient au point les premiers lasers à semi-conducteurs fonctionnant à température ambiante.

On s'aperçoit alors qu'il n'y a pas de meilleur matériau connu pour ces applications que la fibre optique et que la lumière est la source de signal la plus performante pour ces applications.

La photonique était née et présentait la capacité intéressante de pouvoir transmettre plusieurs longueurs d'onde lumineuses différentes simultanément dans la même fibre. C'est le multiplexage, WDM★(ou DWDM) pour « *wavelength division multiplexing* ».

En 2002, une source lumineuse standard était capable d'émettre 10^{16} photons par seconde, un détecteur de mesurer 1 bit de seulement 10 photons à la cadence de 10^{15} bits/s à travers une seule fibre optique et on était capable de traiter 64 canaux multiplexés.

Quatrième révolution technologique : celle des MEMS

Les MEMS★ sont considérés comme l'étape suivante dans la révolution de la microélectronique et de nombreux chercheurs pensent qu'ils deviendront aussi omniprésents que les microprocesseurs.

A l'heure actuelle, ils permettent la construction de systèmes qui intègrent :

- soit une fonction d'actuation (micro-moteur);
- soit une fonction de détection (micro-capteur).

Pour réaliser :

- des têtes d'imprimantes jet d'encre,
- des gyroscopes,
- des micromoteurs,
- des micropompes,
- des micro-bancs optiques,
- des platines d'alignement de micro-miroirs,
- des commutateurs optiques;
- des bolomètres,
- des biopuces pour le séquençage de l'ADN, .
- ..

Le développement de la microélectronique a suivi la loi de Moore : « *smaller is better* » et on a conçu des systèmes en connectant des blocs élémentaires génériques (transistors), universels pour différentes applications. Pour les MEMS★, le parallèle ne tient cependant pas puisque la notion de blocs élémentaires génériques n'existe pas.

Et l'optique dans tout cela ?

Les dispositifs photoniques tendent à s'intégrer « naturellement » avec les MEMS★ puisque les technologies de microfabrication existent déjà en optique intégrée :

- LED, Diode laser, Laser;
- Fibre optique;
- Guides d'ondes intégrés, modulateurs pour les télécommunications;
- Miroirs, réseaux de diffraction;
- ...

Puisque les longueurs d'ondes optiques concernent le visible et le proche infra-rouge, les composants d'optique intégrée se situent à l'échelle du micromètre.

Les outils théoriques sont de même disponibles à cette échelle (diffraction scalaire).

4. Les principales catégories de microsystèmes optiques

Les MOEMS★ sont à répartir en deux grandes catégories :

- les composants fonctionnant selon les principes de l'optique géométrique pour la commutation spatiale de la lumière (connectique, switch, ...);
- les composants autorisant la manipulation des interférences optiques (modulateurs, réseaux, ...).

Dans les MOEMS★, la lumière se propage exclusivement dans l'air, mais la tendance est de coupler les microsystèmes optiques avec l'optique intégrée, donc une partie de la lumière se propage alors dans des guides d'ondes.

Les principales catégories peuvent se résumer dans la liste suivante :

- les sources;

- les guides d'ondes optiques;
- l'optique en espace libre;
- l'optique pour les transmissions;
- les miroirs optiques;
- l'optique diffractive;
- l'optique interférométrique;
- les détecteurs.

Complément

Ces catégories feront l'objet d'un développement dans le grain de cours « Applications de la micro-optique »

5. Techniques et procédés de fabrication

Matériaux pour la micro-fabrication

Le silicium monocristallin est le matériau le plus répandu pour la micro-fabrication pour un certain nombre de raisons (cf partie suivante « Caractéristiques du silicium ».).

Le germanium ne constitue pas une alternative au silicium pour ce genre d'applications. En effet, pour le germanium, l'oxyde natif GeO_2 est soluble à l'eau ce qui le rend inintéressant pour la photolithographie.

Le verre représente un matériau particulièrement intéressant pour les utilisations chimiques ou biologiques des systèmes optiques.

Les principes de microfabrication à partir du silicium que nous exposons ci-après s'appliquent pour une bonne part aux verres.

On peut citer d'autres matériaux utilisés pour la micro-fabrication : les polymères, les métaux et les semi-conducteurs III-V (AsGa, InP, ...) principalement.

Caractéristiques du silicium

Pourquoi le silicium ?

- Disponibilité du matériau et documentation considérable sur ses propriétés;
- Très grande pureté (monocristallin);
- Multitude de processus de micro-fabrication bien établis permettant de fabriquer des dispositifs avec des précisions largement sub-micrométriques;
- Anisotropie intéressante pour la micro-fabrication;
- Possibilité d'intégration des fonctions capteurs et actionneurs avec les circuits électroniques associés;
- Caractéristiques physico-chimiques compatibles avec un grand nombre de processus;
- Fortement piézo-résistif (intérêt pour réaliser des déformations);
- Très bonnes propriétés mécaniques par rapport aux métaux (bonne résistance à la fatigue mécanique, propriétés élastiques reproductibles, pas de zone plastique,...)
- Technologies des capteurs Si identique à celle des circuits intégrés (miniturisation, fabrication collective, équipements existants, ...).

Le silicium est livré sous la forme de plaquettes (ou wafer) constituant presque un monocristal.

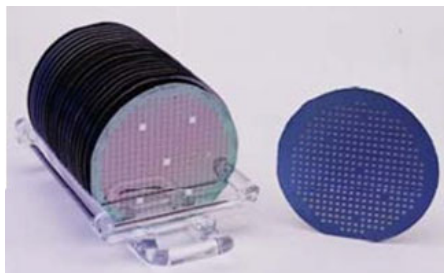


Image 05

Le silicium est produit par un processus de croissance cristalline bien contrôlé, prenant place dans un environnement très propre de classe 1 ou 10 (cf paragraphe suivant « L'environnement de la micro-fabrication ».).

Le processus de croissance consiste à tirer lentement un cristal d'un bain de silicium ultra-pur, l'ensemble étant en rotation.



Image 06

On obtient ainsi un cristal cylindrique, dont on découpe des tranches de quelques centaines de microns d'épaisseur. Vient ensuite une étape de polissage atomique de façon à conduire à la fabrication d'une plaquette quasi lisse atomiquement sur ses faces polies et dont l'orientation cristallographique est identifiée par deux méplats.

Du point de vue cristallographique, le silicium est un cristal cubique dont la structure est celle du diamant dans laquelle on identifie deux réseaux cubiques à faces centrées imbriqués. Chaque atome de silicium tétravalent appartenant à un réseau donné est au centre d'un tétraèdre.

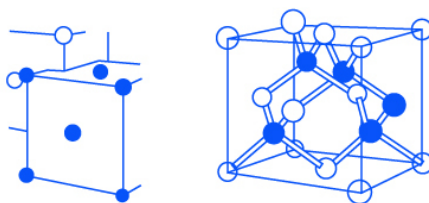
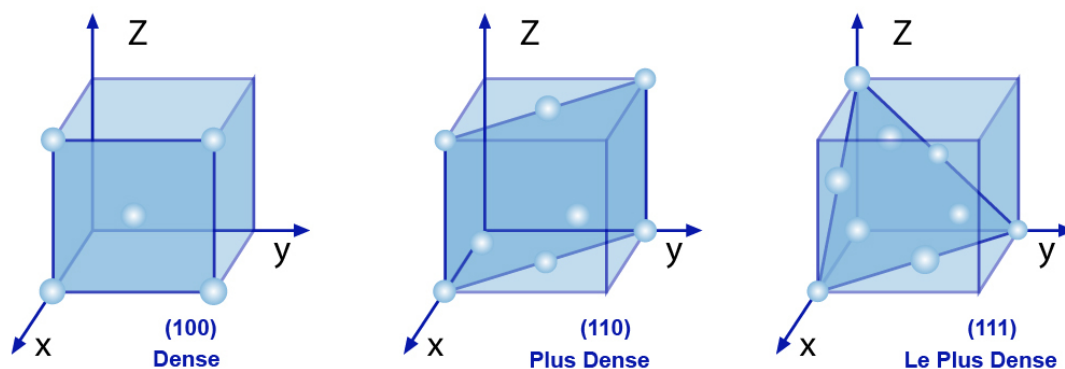


Image 07

La maille du réseau est de $54,3\text{nm}$.

Les plans de plus haute densité sont les plans (111) qui forment un angle égal à $54,74$ degrés par rapport aux plans (100).



Adapté de: S.M. Sze, dispositifs semiconducteurs

Image 08

Il existe aussi des cas particuliers de « wafers » multicouches Si-SiO₂-Si plus connus sous le nom de « wafers » SOI★ pour « Silicon On Insulator ».

L'environnement de la micro-fabrication

Compte-tenu des dimensions des objets mis en jeu, l'environnement doit être très propre. En effet, une poussière « standard » est de taille micrométrique et a tendance à s'adsorber sur les surfaces.



Image 09

Définition : Qu'est-ce qu'une salle blanche ?

Une salle blanche est un environnement de travail à température (20°C) et à l'hygrométrie régulées, traversé en permanence par un flux d'air filtré en légère surpression permettant l'élimination ininterrompue des poussières et des gaz qui s'introduisent.

Une salle blanche est identifiée par une classe qui représente le nombre de poussières dont la taille est inférieure à 4µm, contenues dans un volume égal à un pouce-cube (un pouce = 2,54cm).

Classes typiques pour les MEMS★ : 1000-10000

Classes typiques pour la micro-électronique : 1-10

Classe	Nombre maximal de particules par pied-cube d'air de diamètre supérieur ou égal aux tailles indiquées					Applications typiques
	0,1 μm	0,2 μm	0,3 μm	0,5 μm	5 μm	
1	35	7,5	3	1		Circuits intégrés
10	350	75	30	10		
100		7502	300	100		Marquage de micro-billes; labo photo; implants médicaux
1000				1000	7	
10000				10000	70	Tubes TV couleur; blocs opératoires
100000				100000	700	Marquage de billes

Tableau des classes des salles blanches

Photolithographie et masquage

La photolithographie est le premier processus jouant un rôle central dans la micro-fabrication. Il consiste à insoler une résine (polymère) photosensible à travers un masque préalablement déposé sur un substrat de façon à « dessiner » une structure ou un élément de structure.

On distingue plusieurs familles de techniques de lithographie en fonction de la longueur d'onde de la source du rayonnement utilisé :

- source à rayons X
- source à électrons
- source à faisceau d'ions
- source de lumière visible, uv ou infra-rouge

Evidemment plus la longueur d'onde est faible, plus la précision est grande.

Les masques utilisés sont en général des plaques de quartz sur lesquelles un dépôt de chrome formant le motif a été réalisé, dans la plupart des cas, à l'aide d'un faisceau d'électrons avec une précision de l'ordre de la fraction de micron.

Il n'est a priori pas possible de fabriquer un objet avec une précision géométrique supérieure à celle du masque.

La photolithographie comporte ainsi 5 étapes :

- étape n°1 : préparation du wafer, il s'agit d'une phase essentielle de nettoyage pour éliminer poussières et impurétés à la surface
- étape n°2 : dépôt d'un film mince de résine (typiquement $2\mu\text{m}$) par une méthode de centrifugation (tournette)
- étape n°3 : insolation au travers d'un masque, cette étape nécessite l'utilisation d'un aligneur de masque
- étape n°4 : développement de la résine insolée avec un solvant;
- étape n°5 : polymérisation finale de la résine en portant le système environ 10mn à une température supérieure à la transition vitreuse.

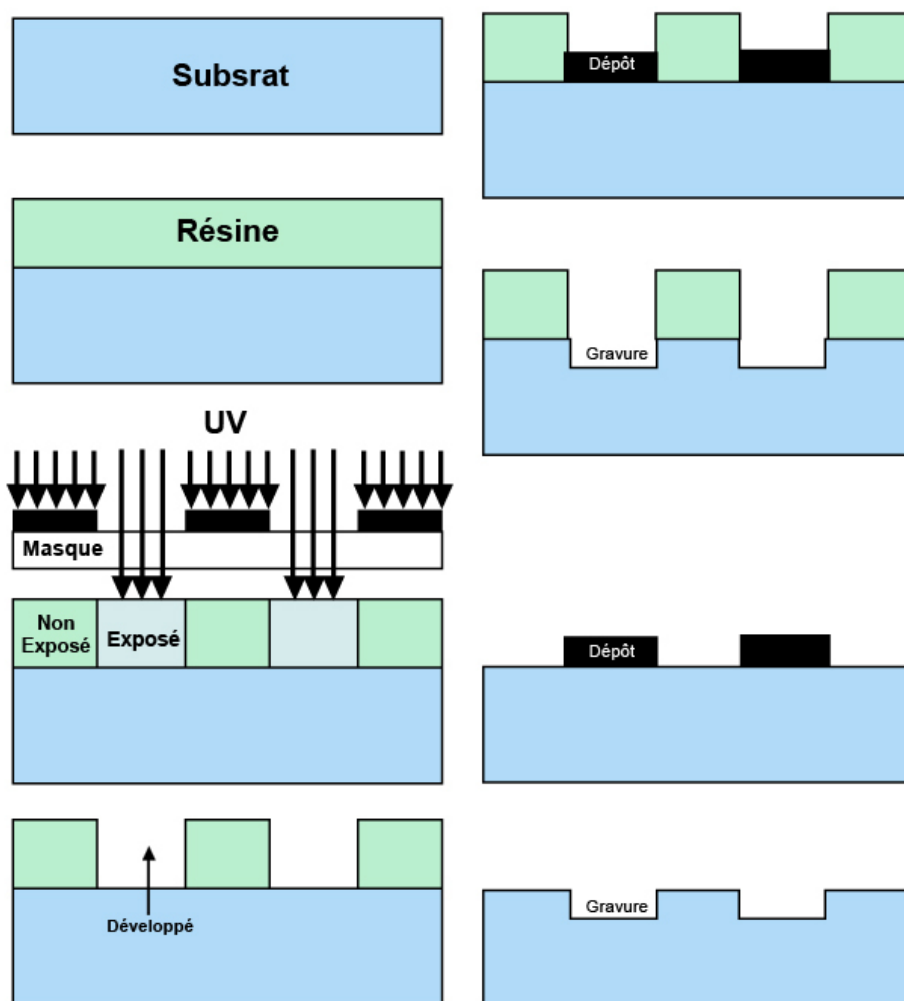


Image 10

On utilise deux types de résines différentes en fonction du résultat attendu :

- résine « positive » : l'étape de développement conduit à l'élimination de la résine insolée au travers du masque, découvrant ainsi des ouvertures vers le substrat qui dessinent la structure en négatif;
- résine « négative » : l'étape de développement conduit à l'élimination de la résine non insolée, laissant ainsi la résine polymérisée sur le substrat qui dessine la structure en positif.

La photolithographie consiste donc à délimiter des zones actives dans la résine photosensible pour créer des ouvertures sur le substrat. Les autres zones servent alors de couche de protection du substrat lors du processus de gravure.

Les résines doivent posséder les caractéristiques suivantes :

- fort contraste de solubilité entre les zones insolées et non-insolées;
- forte photosensibilité pour absorber le rayonnement;
- bonne résistance à certaines classes d'agents chimiques.

Exemples de résines :

- résines « positives » : PMMA (polyméthylmétacrylate), DQN, AZ, ... , ces résines sont solubles dans des solutions fortement alcalines comme le KOH ou les acétates;
- résines « négatives » : KTRF ou SU8, cette dernière est assez récente (10 ans environ, IBM) et autorise des structures de fort rapport d'aspect pour des dépôts en couches épaisses et une haute photosensibilité.

Transfert de la technologie des CI vers le micro-usinage

Pour réaliser un microsystème à partir d'un simple wafer, il est nécessaire d'ajouter ou de supprimer de la matière afin de créer une structure 2D ou 3D. Pour cela il est nécessaire de réaliser des étapes de dépôts de couches supplémentaires ou des étapes de gravure du substrat de silicium ou de verre.

Procédés « circuits intégrés »	Procédés « microsystèmes »
Oxydation	Micro-usinage de surface
Diffusion	Micro-usinage de volume (humide ou sec)
LPCVD	Soudure de wafers
Photolithographie	Moulage
Epitaxie	Photolithographie double face
Evaporation	Matériaux actifs spécifiques (alliages à mémoire de forme, piézoélectriques, ...)
...	...

Les méthodes de micro-usinage

On distingue deux technologies principales de micro-usinage :

- le micro-usinage de volume (« *bulk micromachining* »)

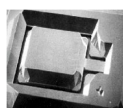


Image 11

- le micro-usinage de surface (surface micromachining)

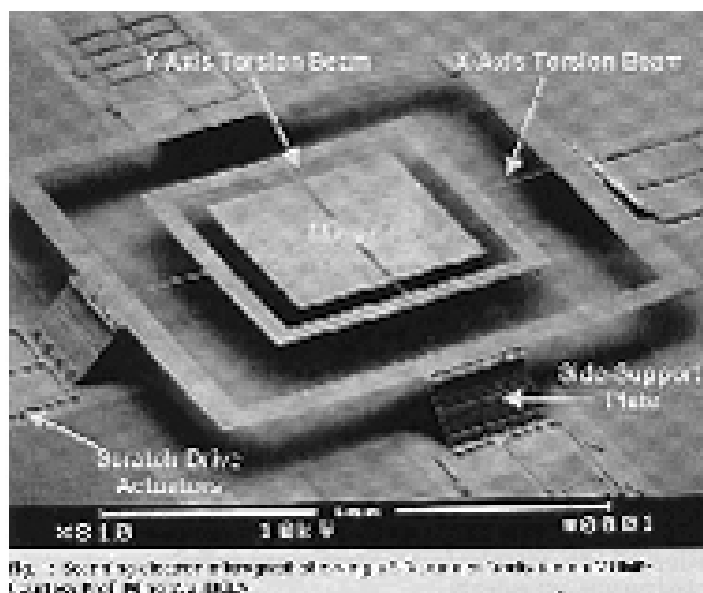


Fig. 1 Scanning electron micrograph of a micro-machined device. Courtesy of Intel Corporation.

Image 12

avec les caractéristiques suivantes :

Bulk		Surface
~ 5 μm	Taille de l'objet	< 1 μm
~ 1 μm	Taille particulière	~ 1 μm
~ 100 μm	Epaisseur	~ 1 à 3 μm
Réalisation de trous, tranchées, sillons		Dépôt de couches minces

5.1. Les méthodes de micro-usinage

Elle consiste à soumettre un objet, dont certaines parties ont été protégées par un masque, à une attaque chimique en phase liquide, gazeuse ou plasma.

On dispose aujourd'hui de nombreuses données sur les vitesses de gravure dans différentes conditions, autorisant le contrôle de la géométrie de l'objet gravé.

En fonction de la méthode de gravure utilisée on obtient :

- soit une gravure isotrope pour laquelle la gravure se produit de manière équivalente (ou presque) dans toutes les directions à partir du point d'attaque;
- soit une gravure anisotrope pour laquelle la gravure se produit selon des directions bien définies.

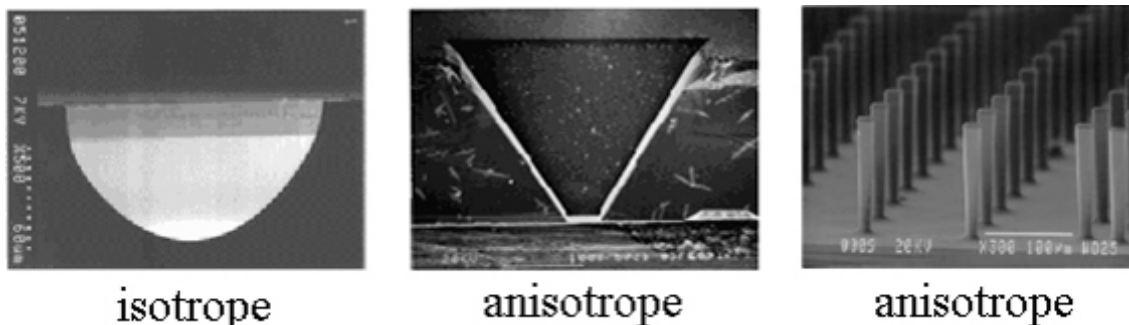


Image 13

Les gravures isotropes conduisent en général à des phénomènes de sous-gravure débordant sous les parties masquées.

A l'inverse, les gravures anisotropes sont plus aptes à une maîtrise des paramètres géométriques mais sont souvent plus difficiles à mettre en oeuvre.

On distingue deux technologies particulières :

- les méthodes de gravure humide qui utilisent une réaction chimique; elles sont caractérisées par une faible résolution, une direction de gravure difficile à contrôler, limitée à une seule géométrie 2D; l'arrêt de la gravure se fait par rinçage dans la plupart des cas ou atteinte d'une couche barrière;
- les méthodes de gravure sèche qui utilisent un procédé physique de gravure (bombardement par faisceaux d'ion, d'électrons, ...); elles sont caractérisées par une haute résolution, elles sont très directionnelles, les géométries 2D sont illimitées

Exemple : la gravure isotrope humide du silicium et du verre

Les solutions employées sont des acides (HNA, mélange de HF, HNO₃ et CH₃COOH pour le silicium ou HF pur pour la silice).

Température : 25°C

Vitesse : 1 à 20 μm/mn

Arrêt sur nitrure ou éventuellement SiO₂ dans le cas du silicium

Exemple : La gravure anisotrope humide du silicium

Contrairement à la gravure isotrope qui utilise des solutions acides, la gravure anisotrope humide peut être obtenue en utilisant des solutions alcalines de forte concentration (solutions fortement basiques) de KOH (soude), EDP, TMAH, ...

La gravure est lente suivant les plans (111) : 13 μm/h, et plus rapide (60 fois) pour les plans (100) et (110)

Hautes températures : > 50°C

... mais le processus de gravure n'est toujours pas totalement maîtrisé à l'heure actuelle !

Exemple : La gravure sèche du silicium ou du verre

Elle consiste en l'attaque d'un substrat par une espèce ionique contenue dans un gaz ou un plasma.

Ce type de gravure est très riche : suivant les conditions de gravure, les formes obtenues sont isotropes ou anisotropes, l'anisotropie est contrôlée par le système et non par la structure cristalline de l'objet gravé (on peut donc graver des canaux droits dans du verre).

En jouant sur la nature du plasma contenant les ions, quatre types de gravure existent :

- gravure physique ou pulvérisation : des ions sont accélérés par un champ électrique bombardant la surface de l'objet (cible) à graver et conduisent à une gravure anisotrope et peu sélective, la pulvérisation est en général réalisée à basse pression pour éviter le redépôt de matière, la vitesse de gravure du silicium est de $0,6$ à $18\mu\text{m}/\text{mn}$;

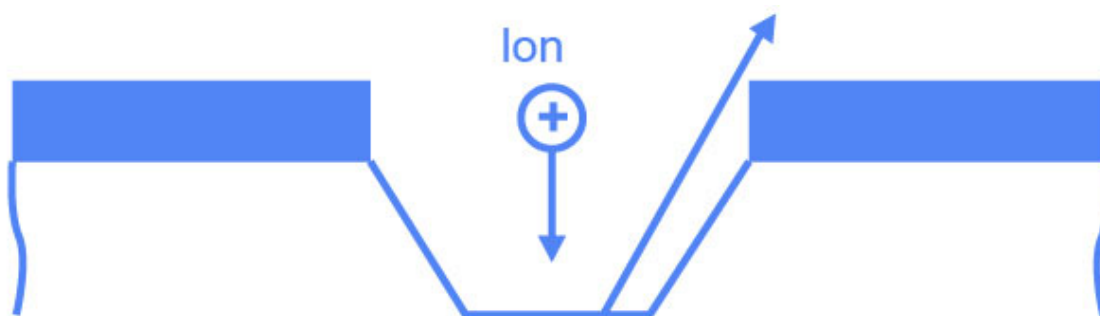


Image 14a

- gravure chimique : l'objet à graver est en contact avec des composés réactifs contenus dans le gaz ou le plasma qui, migrant vers la surface de la cible sous l'action d'un champ électrique, développent des réactions chimiques en surface, produisant des espèces volatiles et des trous, la gravure du silicium est isotrope avec une vitesse de quelques $\mu\text{m}/\text{mn}$, la surface gravée est rugueuse;

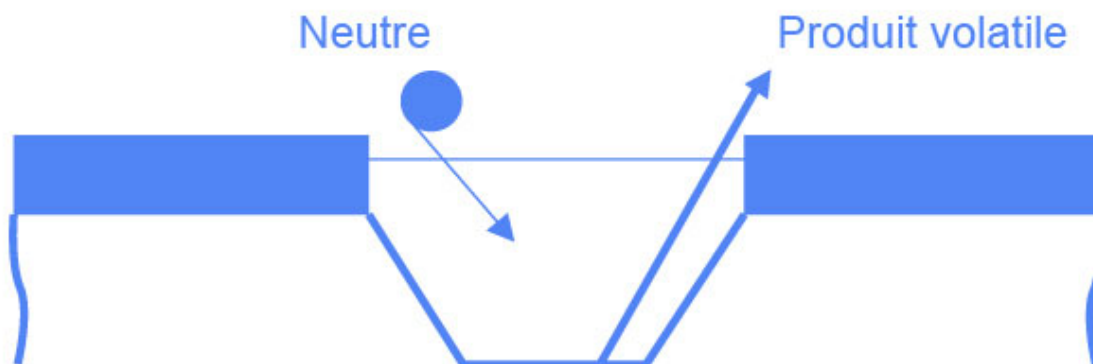


Image 14b

- gravure physico-chimique : les deux actions précédentes sont combinées, ce type de gravure est connu sous le nom de RIE★ pour « *Reactive Ion Etching* », c'est le plus fréquent dans le domaine de la micro-fabrication, la gravure est anisotrope avec des vitesses de gravure du silicium de $0,1\mu\text{m}/\text{mn}$, il est très utilisé pour graver le verre de silice;

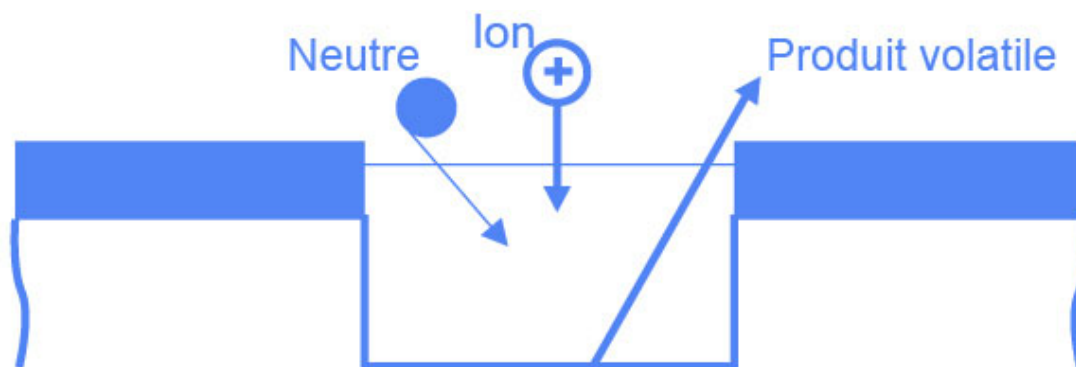


Image 14c

- gravure physico-chimique avec inhibiteur : il s'agit là d'un processus sophistiqué qui consiste à déposer des couches protectrices le long des flancs des cavités gravées, pendant que le fond est attaqué chimiquement et physiquement, ce type de procédé permet de réaliser des gravures anisotropes profondes ($> 500\mu\text{m}$) à fort rapport d'aspect (30:1) d'où son nom de « Deep-RIE » avec des vitesses de gravure de 2,5 à $4\mu\text{m}/\text{mn}$.

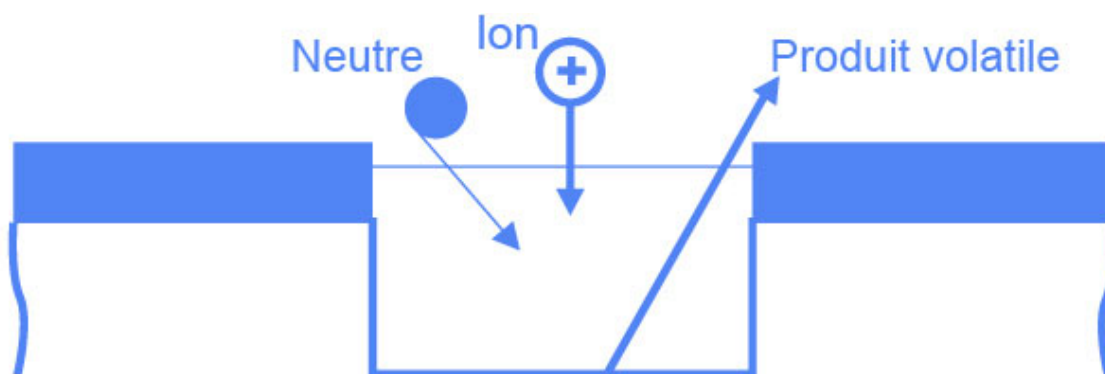


Image 14d

Exemple : Les procédés par Fusion Bonding, SOI « Silicon On Insulator » ou collage de wafers

Le principe consiste à graver un motif large (par exemple rectangulaire) à la surface du wafer substrat. Un second wafer est collé par fusion pour former une cavité. Le motif final (poutre monoencastrée, plaque suspendue, ...) est réalisé sur le wafer supérieur par Deep-RIE.

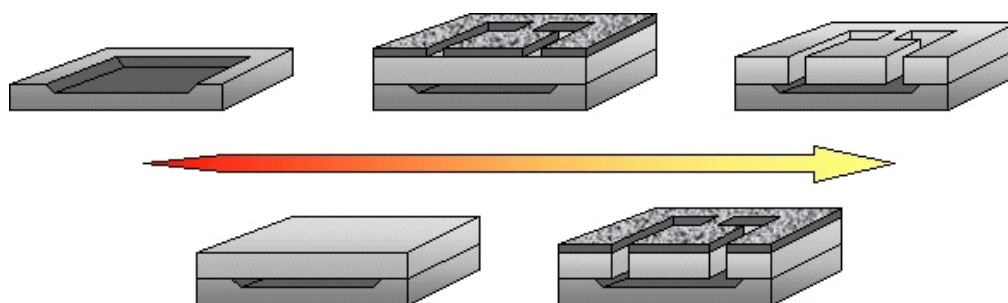
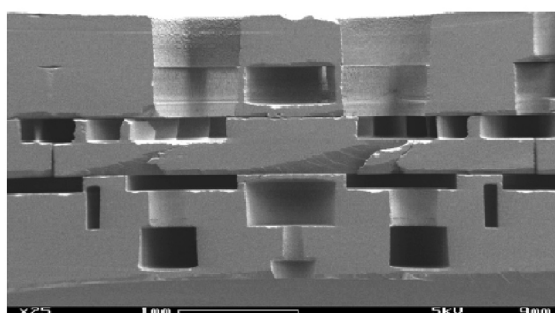
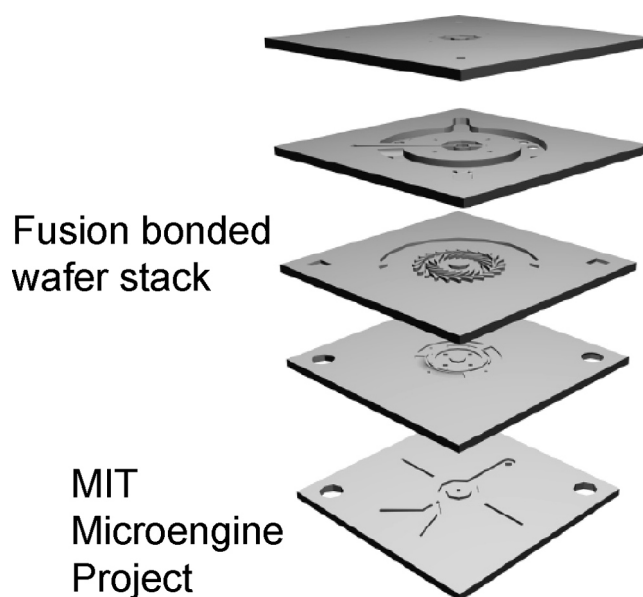


Image 15a

On peut ainsi combiner des formes complexes à partir d'empilement multiples de wafers (Si-Si ou Si-Verre).



M. Schmidt, 2000

Image 15b

Exemple : Les procédés de micro-moulage dont le procédé LIGA

Ces technologies sophistiquées permettent de très bons facteurs de forme mais sont difficiles à mettre en oeuvre et coûteuses notamment car elles reposent souvent sur une lithographie par rayons X ou synchrotron.

5.2. Le micro-usinage de surface

C'est une technologie d'usinage couche à couche.

Différentes couches sont déposées sur un substrat par des procédés de déposition de film mince (CVD^{*}, *sputtering*, ...) et certaines de ces couches sont ensuite enlevées (couches sacrificielles), notamment pour libérer des structures mobiles (fabrication des micro-miroirs orientables).

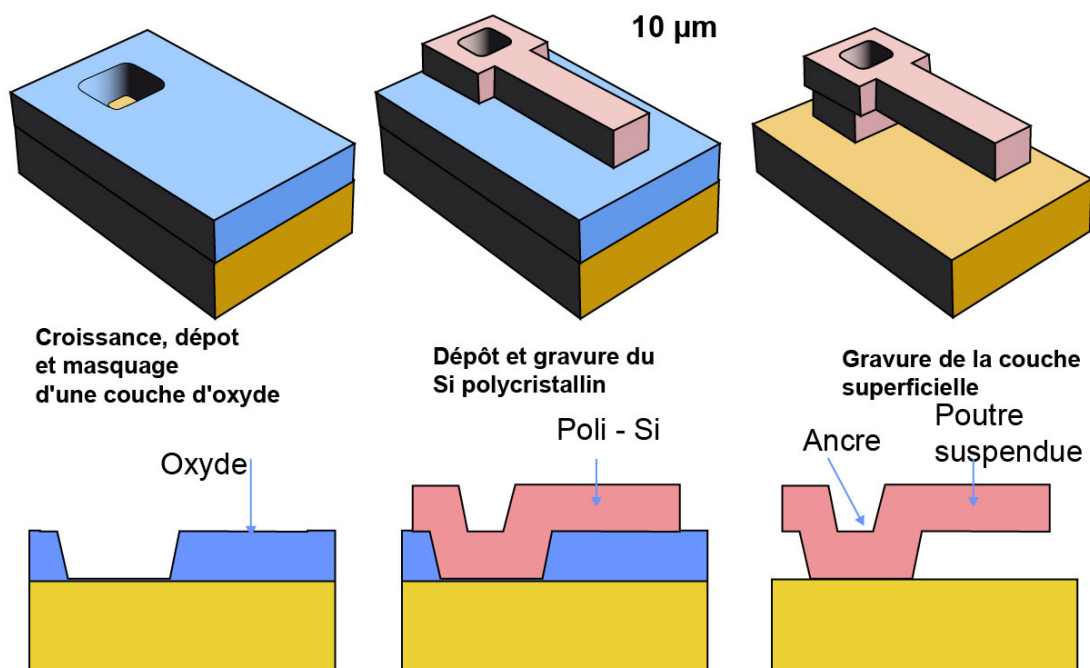


Image 16

Ces structures sont parfois soulevées verticalement afin de réaliser des surfaces optiques perpendiculaires au substrat.

Le dépôt est une opération jouant un rôle important dans tous les processus de micro-fabrication. Il existe à l'heure actuelle une grande diversité de techniques qui permettent de déposer toute sorte de matériaux : des isolants, des métaux, des semi-conducteurs, des polymères, des protéines, ...

On peut regrouper une bonne partie des techniques de dépôt en deux catégories :

- **les dépôts physiques ou PVD**★ « **Physical Vapor Deposition** » : dans ce cas, l'objet (la cible) est mis en contact avec un gaz contenant certaines espèces qui s'adsorbent à la surface en formant une couche mince;
- **les dépôts chimiques ou CVD**★ « **Chemical Vapor Deposition** » : dans ce cas, les espèces en contact avec la cible développent des réactions en surface et forment des composés qui sont chimiquement liés à l'objet.

Pour ces derniers, il y a deux possibilités :

- soit la réaction prend place dans le gaz et les produits de la réaction sont adsorbés sur la surface de la cible, la réaction est dite homogène;
- soit la réaction se développe à la surface de la cible, la réaction est dite hétérogène.

La plupart des appareils de dépôt par voie CVD★ sont basés sur des réactions hétérogènes et on comprend alors que l'adhérence des couches ainsi produites soit meilleure que dans le cas des réactions homogènes.

La méthode de CVD★ permet par exemple de déposer des isolants (pour des masques ou des isolations électriques) et du silicium polycristallin (pour le micro-usinage de surface).

Les vitesses de dépôt sont lentes dans tous les cas (de l'ordre de $1\ \mu\text{m}/\text{h}$) ce qui pose un problème pour fabriquer des microstructures épaisses et la plupart des structures reproduites dans la littérature n'ont que quelques microns de hauteur.

Exemple : Exemples de dépôts physiques PVD

L'évaporation thermique :

Le matériau que l'on veut déposer est placé dans un creuset, positionné face à la cible, il est ensuite porté à haute température et évaporé (ou sublimé). L'évaporation produit un flux d'atomes venant s'adsorber à la surface de la cible.

Ce dépôt s'effectue concurrentiellement avec d'autres molécules contenues dans l'enceinte. Il est donc nécessaire de travailler à basse pression pour éviter les dépôts parasites et les contaminations.

Du fait de sa simplicité, la technique de dépôt thermique est très employée dans les laboratoires.

La pulvérisation ou sputtering :

Cette méthode est souvent préférée à l'évaporation thermique car elle permet de déposer une plus grande diversité de matériaux et l'adhérence des couches est meilleure.

Il est nécessaire de créer un plasma froid et la technique est comparable à celle utilisée pour la gravure sèche physique. La différence tient au fait que l'on place la cible sur l'anode. Le creuset contenant le matériau ou un échantillon du matériau à pulvériser et à déposer est quant à lui placé sur la cathode.

On recueille des ions énergétiques au niveau de la cible qui pénètrent sur une ou deux couches moléculaires du substrat conduisant ainsi à une meilleure adhérence.

Exemple : Exemples de dépôts chimiques CVD

LPCVD★ « Low Pressure Chemical Vapor Deposition »

Il s'agit d'une méthode de dépôt à basse pression.

La cible est portée à une température élevée (plusieurs centaines de degrés) et l'activation thermique permet le développement de réactions chimiques hétérogènes.

Cette méthode est utilisée pour le dépôt du silicium polycristallin.

APCVD★ « Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition »

Dans ce cas le dépôt s'effectue à pression atmosphérique.

PECVD★ « Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition »

Lorsque l'activation thermique n'est pas suffisante pour permettre le développement des réactions chimiques, on fait appel à un plasma dont le rôle est d'activer des réactions chimiques à la surface de cible, grâce à un bombardement ionique.

Remarque

Évaporer un matériau sur un relief pré-existant ne conduit pas nécessairement à des couches d'épaisseur uniforme. On a été amené à distinguer deux cas :

- le dépôt conforme : dans ce cas, le film déposé possède une épaisseur constante en tout point de la surface de la cible, il épouse donc la forme des reliefs existant à la surface;
- le dépôt non conforme : il n'a pas une épaisseur constante et présente des bourrelets et des creux au niveau des changements brusques du relief.

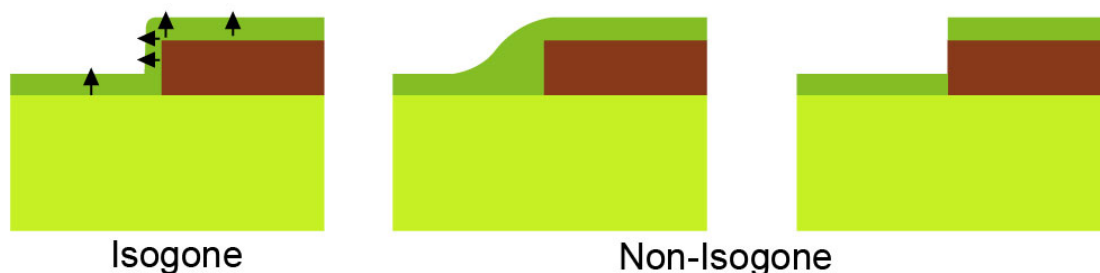


Image 17

Remarque : Cas particulier de la fabrication des couches de silice

Comme le silicium réagit avec l'oxygène de l'air à haute température, il est possible d'obtenir la croissance d'une couche d'oxyde de silicium dont l'épaisseur ne dépasse pas $2\mu m$ (3h à $1000^{\circ}C$) à la surface d'un wafer de silicium pur.

5.3. L'auto-assemblage des MOEMS

Les techniques de micro-usinage de surface sont limitées à la fabrication de structures 2D.

Une solution proposée consiste à concevoir des figures pivotantes pour autoriser la réalisation de structures 3D complexes. Pour cela on utilise un assemblage de deux éléments par une soudure fondue au niveau d'une arête commune. C'est la minimisation de l'énergie de surface pour un mouvement de reflux de la soudure fondue qui va produire la mise en mouvement d'un élément pour l'amener à se placer dans la position assemblée finale par pivotement autour de l'axe de la soudure.

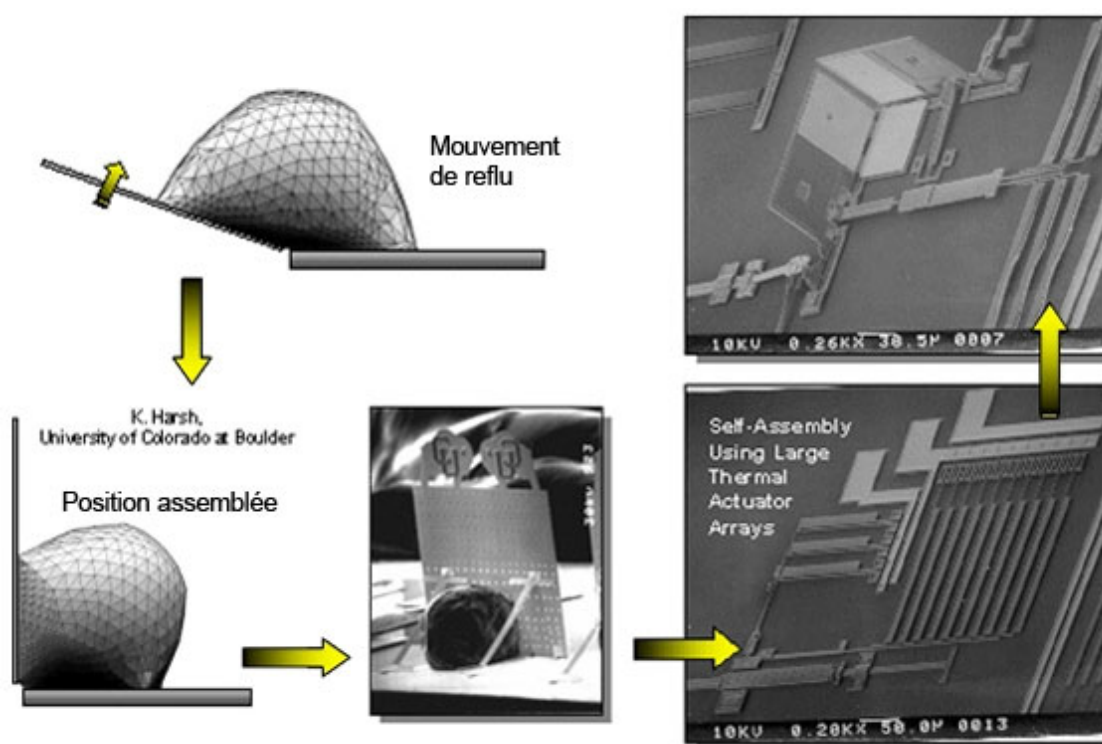


Image 18

Les avantages de cette technique :

- précision sub-micronique de l'assemblage en parallèle d'un grand nombre d'éléments;
- contrôle de l'assemblage en utilisant des guides pour la translation ou la rotation;
- pas besoin d'avoir recours à des macro-structures externes;
- permet de réaliser des contacts et des interconnexions mécaniques, électriques ou thermiques;
- fiabilité.

5.4. Autre procédé de micro-usinage : l'ablation laser

C'est une technologie d'usinage récente qui repose sur l'utilisation d'un faisceau laser intense (UV ou IR) générant des impulsions ultrabrèves (femtosecondes).

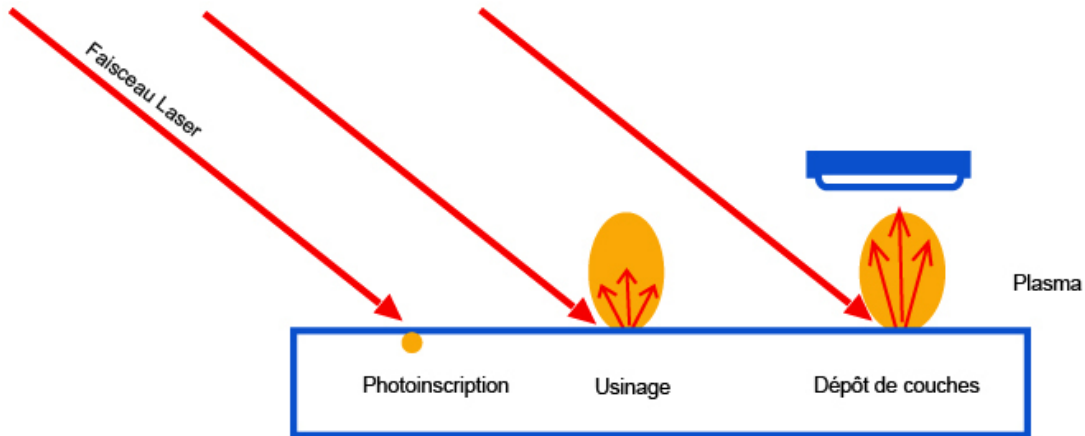


Schéma de synthèse des différents procédés pouvant utiliser des impulsions ultra brèves

Image 19

L'utilisation des impulsions ultrabrèves est souvent motivée par l'absence de dommages collatéraux.

Avantages des impulsions fs :

- champ électrique très élevé;
- arrachement des électrons des couches externes;
- créations d'ions positifs qui se repoussent;
- l'éjection de matière est supposée athermique.

On perce pratiquement tous les matériaux (des aciers aux polymères) par cette technique mais les résolutions restent faibles de quelques dizaines de μm .

6. Caractérisation des microsystèmes par la mesure optique

Les techniques basées sur l'interférométrie optique apportent des informations précieuses sur les micro-dispositifs qui sont destinés à actionner ou à être actionnés ou à être déformés.

De plus, ces mesures sont sans contact.

On peut mesurer par exemple :

- le profil 3D d'un composant ;
- les paramètres de déflexion d'un micro-actionneur;
- le profil 3D dynamique de déformation d'un micro-miroir;
- le comportement thermique d'un micro-composant lors d'un échauffement;
- la détection de défauts de fabrication ou de contraintes;
- ...

7. L'interaction de la lumière avec les micro-structures

Cas d'une molécule :

- la diffusion de la lumière est due à l'oscillation harmonique du dipôle induit.

Cas de nanoparticules :

- S'il s'agit d'un isolant, c'est la diffusion Rayleigh (ciel bleu);
- S'il s'agit d'un semi-conducteur, il y a une absorption résonante à une énergie supérieure à l'énergie de bande interdite et on observe un phénomène de fluorescence dépendant de la taille de la nanoparticule;
- S'il s'agit d'un métal, il y a une absorption résonante à la fréquence du plasmon de surface sans émission de lumière.

Cas des microparticules :

- dans le cas de particules dont les dimensions sont de l'ordre de la longueur d'onde optique ou supérieures, on observe une augmentation de la diffusion vers l'avant et un arc en ciel dû à la diffusion de l'eau.

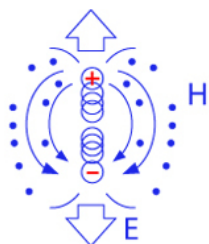
Diffusion de la lumière par des molécules ou des nanoparticules isolantes

Une molécule ou une nanoparticule isolante se polarise en présence d'un champ électromagnétique. C'est le champ électrique oscillant de l'onde incidente qui entraîne une oscillation harmonique des électrons et du noyau au tour d'une position d'équilibre que l'on peut décrire à l'aide de la polarisabilité atomique et du modèle de Lorentz :

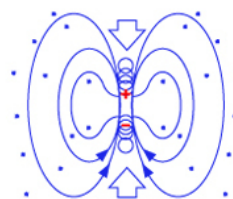
$$p = \frac{e^2}{m} \cdot \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)} \cdot E_L$$

Comme les lignes du champ électrique débutent sur la charge positive, se terminent sur la charge négative et qu'elles ne se croisent pas on observe, après plusieurs périodes d'oscillations des charges le long de l'axe du dipôle formé par l'électron et le noyau, l'émission d'une radiation électromagnétique orientée principalement dans la direction perpendiculaire à l'oscillation et qui dépend de l'angle θ avec cette direction.

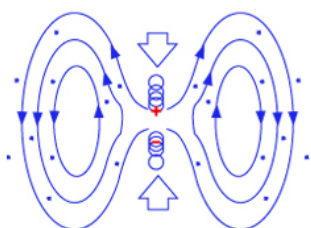
Champs E et H d'une charge oscillante



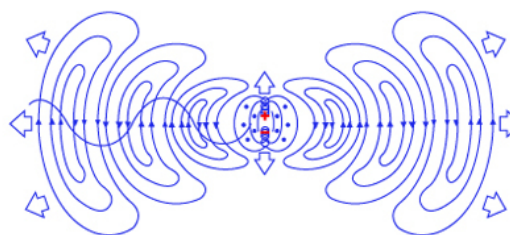
Les lignes du champ E commencent sur la charge + et se terminent sur la charge - .



Les lignes du champ E se referment sur elles-mêmes (elles ne peuvent pas se croiser).



Le début d'une onde EM



Après plusieurs périodes: le rayonnement est perpendiculaire à la direction d'oscillation

Image 20

L'intensité rayonnée par un dipôle p est donnée par la relation :

$$I = \frac{p^2 \omega^4}{32\pi^2 \epsilon_0 c^3 r^2} \sin^2 \theta$$

et la puissance totale diffusée par :

$$P_s = \iint_A I \cdot dA' = \frac{p_o^2 \omega^4}{12\pi \omega_o c^3}$$

où A désigne une surface fermée entourant le dipôle.

Il en ressort l'intensité diffusée par un dipôle de Lorentz soumis à un champ électrique extérieur E_L :

$$I = \frac{e^4 \omega^4}{32\pi^2 m^2 \epsilon_0 c^3 r^2} \left(\frac{1}{\omega_o^2 - \omega^2 - i\gamma\omega} \right)^2 E_L^2 \sin^2 \theta$$

Dont on peut déduire que :

- la diffusion est plus importante au voisinage d'une fréquence de résonance,
- la diffusion est plus importante pour des fréquences plus élevées ou des longueurs d'onde plus faibles,
- la diffusion se produit à la fois vers l'avant et vers l'arrière.

Exemple : Cas d'une diffusion non résonante (le bleu du ciel)

Les molécules d'oxygène (O_2) et d'azote (N_2) de l'air présentent des fréquences de résonance plus élevées que les longueurs d'ondes du domaine du visible, soit $\omega_o \gg \omega$, il en ressort que lorsqu'elles sont illuminées par la lumière solaire, l'intensité diffusée est donnée par :

$$I_s \approx \frac{e^4 \omega^4}{32\pi^2 m^2 \epsilon_0 c^3 r^2} \frac{1}{\omega_o^4} E_L^2 \sin^2 \theta$$

D'où, pour une longueur d'onde deux fois plus faible, l'intensité diffusée est $2^4 = 16$ fois plus importante et donc les longueurs d'onde les plus élevées du spectre de la lumière solaire (donc

au voisinage du rouge) sont les moins diffusées et les longueurs d'onde les plus faibles (donc au voisinage du bleu) sont 16 fois plus diffusées.

La situation est tout à fait analogue lorsqu'on illumine des nanoparticules.

Diffusion de la lumière par des nanoparticules semi-conductrices

Lorsqu'on illumine un matériau semi-conducteur par une radiation lumineuse d'énergie supérieure à l'énergie de bande interdite, des électrons de la bande de valence vont pouvoir passer dans la bande de conduction en créant un trou. Le retour à l'équilibre thermique se traduit par la recombinaison de la paire électron-trou et l'émission d'une radiation à l'énergie de la bande interdite. Si l'énergie de bande interdite correspond à une radiation du domaine optique, c'est le phénomène de photoluminescence.

Si on considère des nanoparticules de silicium (Si^*), on constate que l'énergie de bande interdite dépend du diamètre de la nanoparticule (C. Delerue et al. [Theoretical aspects of the luminescence of porous silicon] Phys. Rev. B48, 11024, 1993).

Influence du diamètre sur la luminescence des nanocristaux de Si

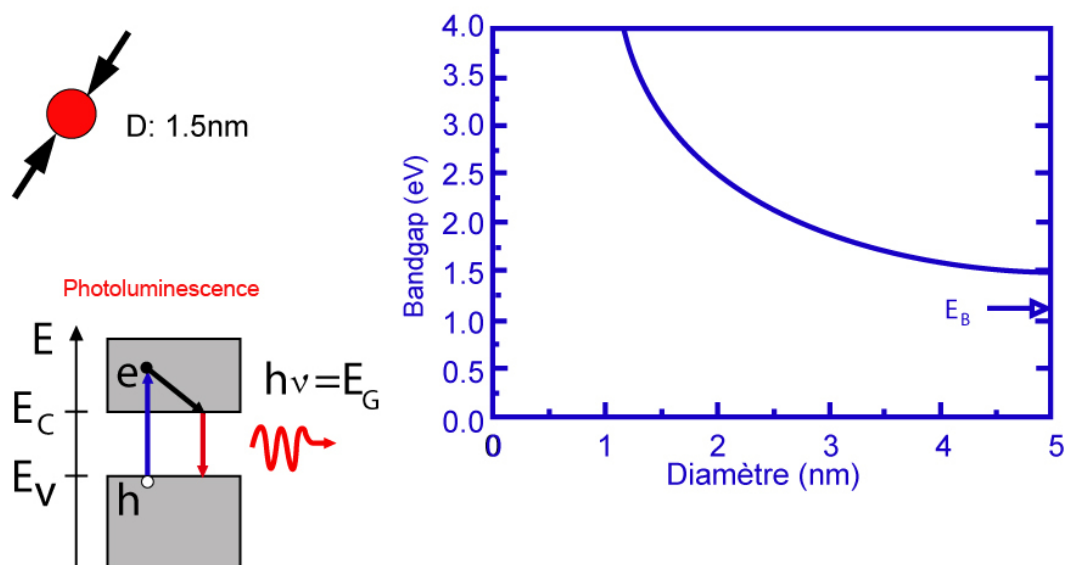


Image 21

De telles nanoparticules de diamètres inférieurs à 5nm peuvent être implantées en envoyant un faisceau de silicium monoatomique d'énergie 50keV sur une couche de silice SiO_2 de 100nm . On peut alors faire évoluer la taille des nanoparticules en provoquant leur oxydation par l'oxygène contenu dans le silicium en portant la température aux alentours de 1000°C .

On constate alors que si on illumine les nanoparticules par une radiation violette de longueur d'onde 458nm ($P = 10\text{mW/mm}^2$, $T = 293\text{K}$), on observe une émission de radiation à une longueur d'onde inférieure à celle de la bande interdite du silicium massif pur et d'autant plus faible que le temps d'oxydation aura été important donc que la taille des nanoparticules est faible.

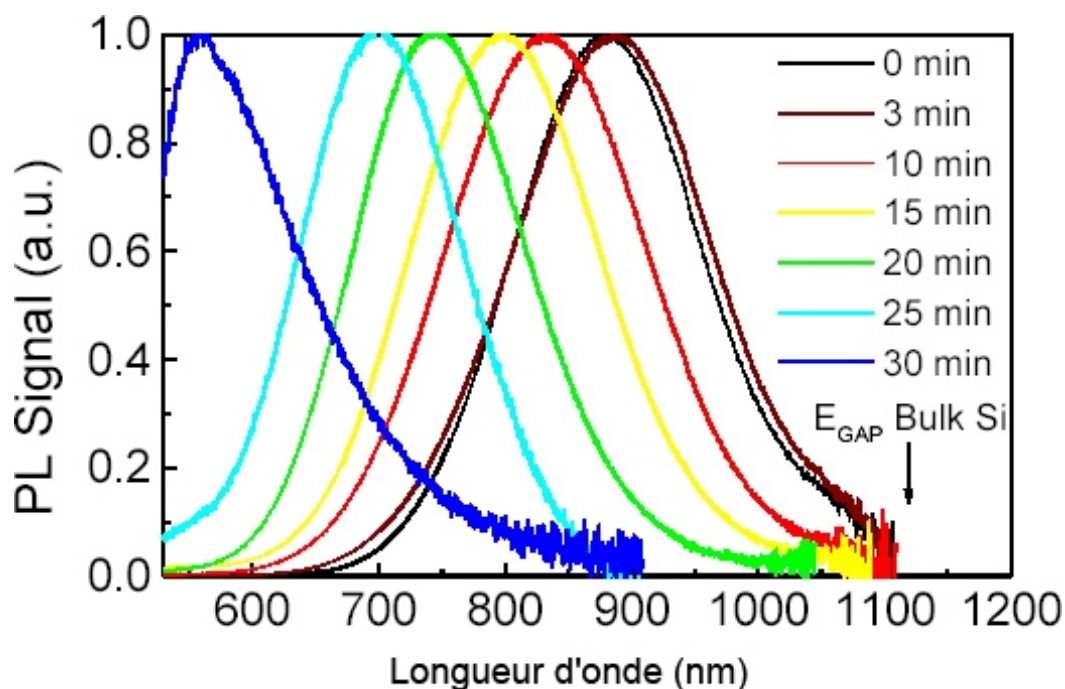


Image 22

On peut déduire de cet exemple que les propriétés optiques des petits objets semi-conducteurs vont dépendre fortement de leur nature et de leur taille et dégager trois grandes catégories en fonction de la longueur d'onde moyenne d'émission (M. Bruchez et al [Semiconductor Nanocrystals as Fluorescent Biological Labels] (Alivisatos group), Science, 2013, 281) :

- « Red series » : nanocristaux d'InAs avec des diamètres de 3 à 6nm;
- « Green series » : nanocristaux d'InP avec des diamètres de 3 à 5nm;
- « Blue series » : nanocristaux de CdSe avec des diamètres de 2 à 5nm.

On peut ainsi envisager des applications aux biopuces en marquant des biomatériaux avec des nanocristaux de semi-conducteurs émettant dans le visible.

Diffusion de la lumière par des particules ou objets de la taille de la longueur d'onde

Si on repart de la théorie donnant l'intensité diffusée par un dipôle dont la taille est très inférieure à la longueur d'onde on constate que si on fait tendre la taille du dipôle vers la longueur d'onde, on augmente la diffusion vers l'avant.

Si maintenant la taille du dipôle atteint le double de la longueur d'onde, on constate une très forte diffusion vers l'avant mais on voit apparaître simultanément :

- des maxima de diffusion dans des directions différentes pour certaines longueurs d'onde dont la répartition est centrée autour sur la direction incidente (c'est l'effet « arc en ciel » observé avec les gouttelettes d'eau);
- des répartitions d'intensité lumineuse analogues pour des groupes de longueurs d'onde ce qui se traduit par des « nuages blancs »!

Exemple : Cas de microsphères de diamètre $d \gg \lambda$

On peut réaliser des microsphères de silice de diamètre $100\mu\text{m}$ en chauffant dans une flamme l'extrémité un barreau creux de silice que l'on aura fait « collapser ».

Si maintenant on approche une fibre optique éfilée (taper), de diamètre de coeur de quelques microns, en la positionnant perpendiculairement à un diamètre de la microsphère, on observe que pour certaines longueurs d'onde il peut y avoir couplage de la lumière se propageant dans la fibre vers un mode de galerie se propageant le long d'un cercle sur la microsphère (Ming

Cai, Oskar Painter et Kerry Vahala [Observation of Critical Coupling in a Fiber Taper to a Silica-Microsphere Whispering-Gallery Mode System], Phys Rev Lett 85, 74, 2000).

On s'aperçoit alors que si la microsphère de silice est dopée à l'Erbium (Er), la microsphère lase !

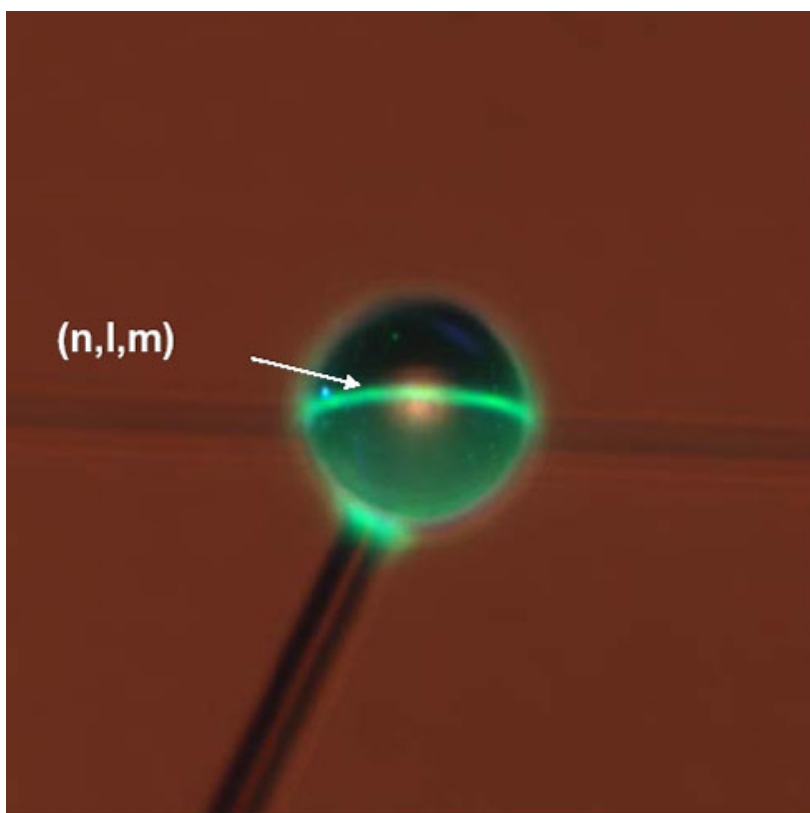


Image 23

La microsphère se comporte alors comme un microrésonateur dont les performances peuvent être caractérisée par la facteur de qualité Q :

$$Q = \frac{\text{Durée de vie d'un photon}}{\text{Période optique}}$$

Dans le cas d'un résonateur laser « classique » un facteur de qualité Q de l'ordre de 10^3 – 10^4 est considéré comme excellent. Le facteur de qualité Q d'un résonateur constitué d'une microsphère de silice de diamètre $100\mu\text{m}$ a été mesuré voisin de 10^{10} par M.L. Gorodetsky, A.A. Savchenkov et V.S. Ilchenko [Ultimate Q of Optical Microsphere Resonators] (Opt. Lett. 21, 453, 1996) !!!

Les microsphères ouvrent ainsi des possibilités d'applications variées telles que :

- microlasers à faible seuil;
- filtres optiques de bande étroite;
- capteurs sensibles en-dessous de la profondeur d'une monocouche;
- multiplexeurs pour les télécommunications;
- optique non linéaire;
- expériences en électrodynamique quantique;
- ...

8. Bibliographie

Pour plus d'informations, vous pouvez consulter les références bibliographiques suivantes :

- Monographie [[Fundamentals of Microfabrication]]
- Articles de périodiques [[MEMS : fabrication, design and applications], [Les microsystemes], [MEMS for optical functionality], [A MEMS based projection system], [III-V semiconductors based MOEMS devices for optical telecommunications], [Micromachinery, rolling at last ?], [Active opto-electronic components], [Silicon as a mechanical material], [Optical MEMS for Lightwave Communications], [Introduction to the issue on Optical Mirco and Nana systems]]
- Ressources Internet [,,,,,, [Venus tout droit du pays des lilliputiens, les MOEMS vont envahir l'espace], [Understanding optical communications],,,]
- Congrès [[Introduction to MEMS], [A design flow for MEMS], [Short course on Optical-MEMS]]
- Thèse [[Optical Propagation methods for system-level modeling of optical MEMS]]

III. Etude de cas : les micro-miroirs orientables

Les systèmes à micro-miroirs orientables sont probablement les systèmes de commutateurs de lumière les plus sophistiqués. L'étude de cas proposée s'appuie sur l'analyse des caractéristiques de micro-miroirs orientables fabriqués par Texas Instruments pour réaliser des systèmes de projection. Ces systèmes font appel à des micro-miroirs orientables répondant à la technologie DMD « *Digital Micromirror Devices* ». Seul l'aspect « micro-optique » de ces objets sera étudié, on ne s'intéressera pas au système d'adressage et de traitement du signal.

Les systèmes à micro-miroirs orientables étudiés sont constitués d'une matrice rectangulaire de centaines de milliers de miroirs microscopiques orientables. Chacun de ces miroirs mesure moins du cinquième de la largeur d'un cheveu et correspond à un pixel dans la construction d'une image projetée.

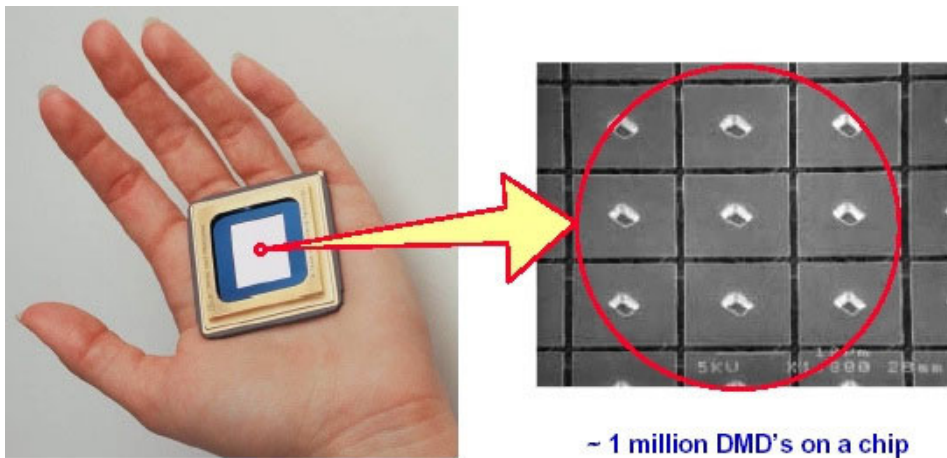


Image 24

La structure de chaque miroir est décrite par le schéma ci-dessous :

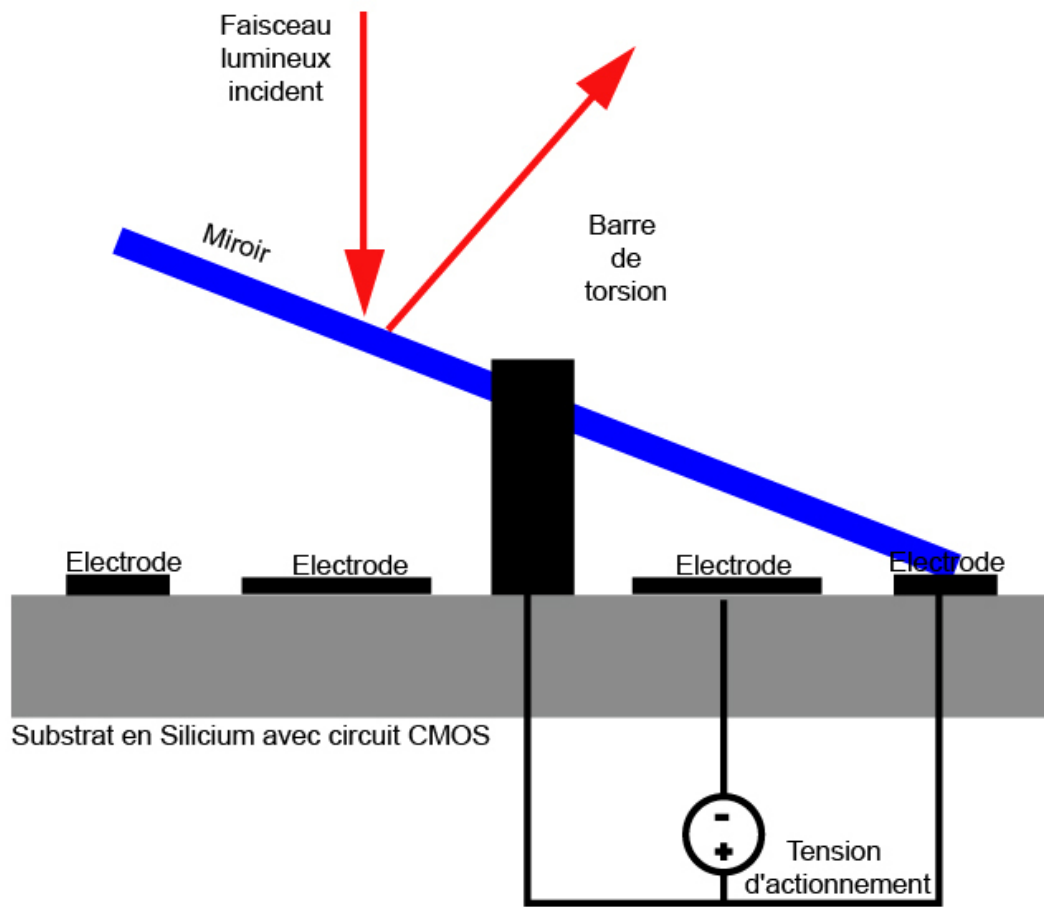


Image 25

de même que le principe du système de projection :

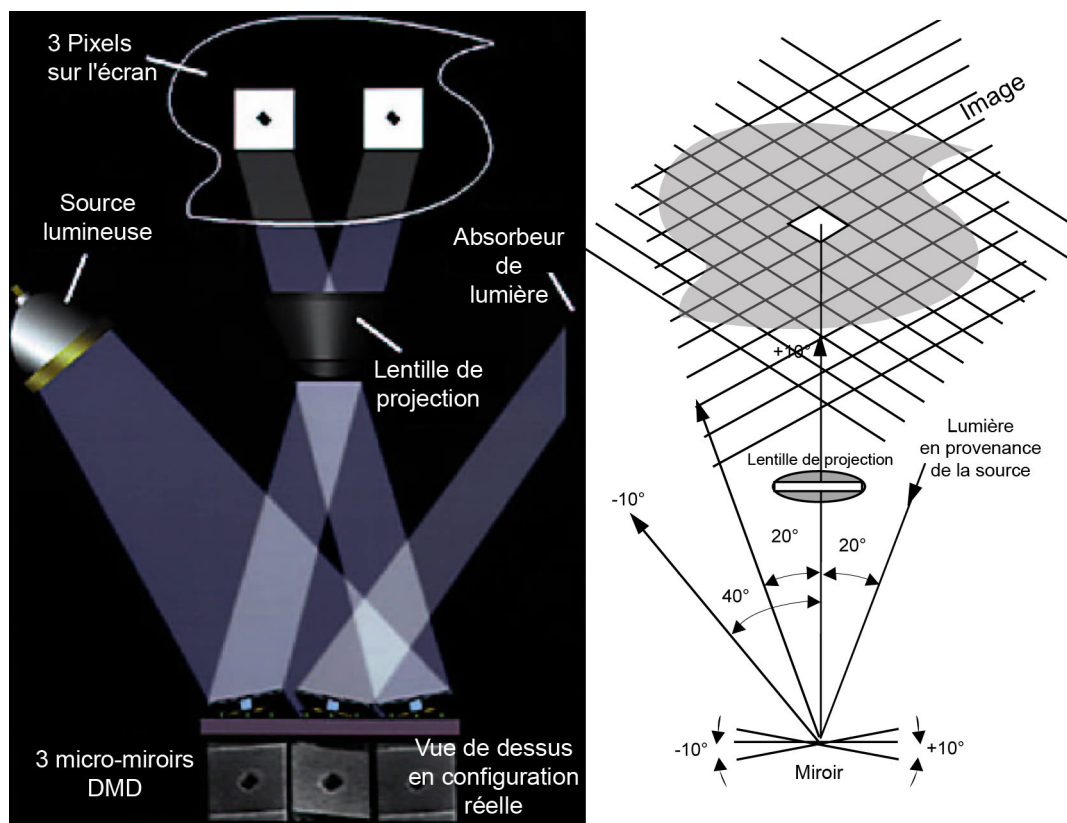


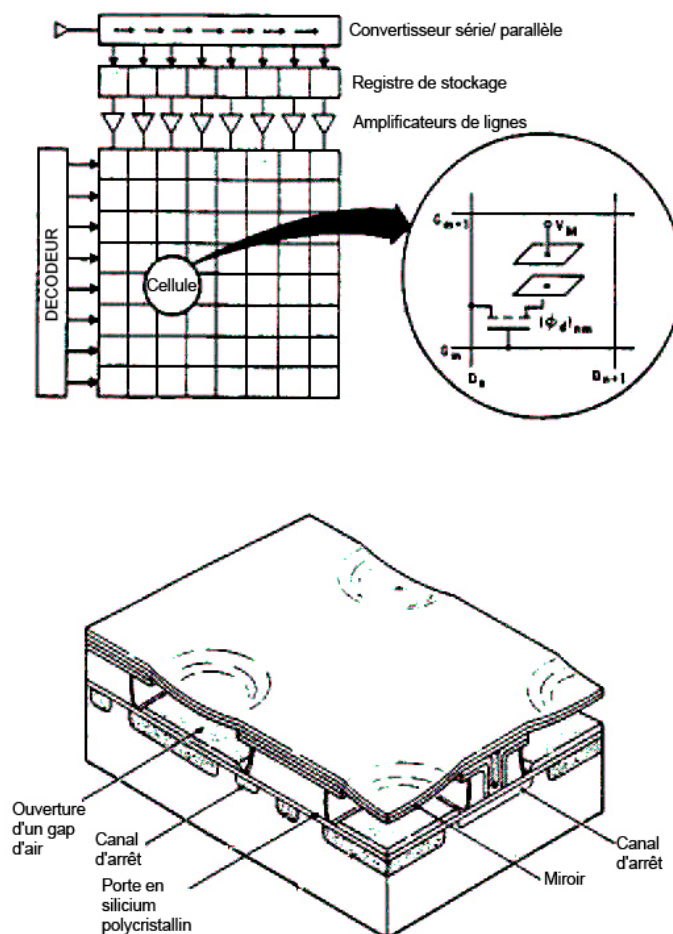
Image 26

Ces systèmes de projection sont caractérisés par :

- une grande luminosité
- un fort contraste
- une échelle des niveaux de gris contrôlée par modulation digitale
- compacts et légers
- faible consommation d'énergie
- particulièrement attractifs pour les systèmes portables.

1. Origine et évolutions

Avant la naissance des DMD★ (« *Digital Micromirror Devices*»), il y avait les DMD (« *Deformable Mirror Devices* ») :



Vue en perspective d'un DMD

Image 27

Les premiers ont été rapportés en 1980 et ils utilisaient les déformations locales d'un miroir métallique (SLM★ : *Spatial Light Modulator*) adressées par une matrice 128 x 128 de transistors CMOS selon une architecture de type DRAM.

Le temps de réponse des miroirs était de l'ordre de $25\mu s$ avec un temps d'attente des sources de $200ms$. Chaque pixel avait une taille de $51\mu m \times 51\mu m$ et était séparé de la source par un gap d'air de $620nm$. La surface active du miroir représentait 32% du total.

On a distingué principalement quatre évolutions des dispositifs :

- les SLM★ à élastomère : le miroir métallique était déposé sur une couche de matériau élastomère déformable qui recouvrait les transistors d'actuation

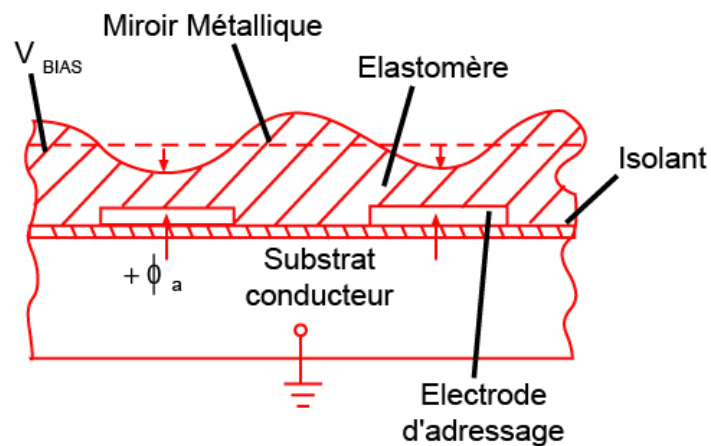


Image 28a

- les SLM★ à membrane : le miroir métallique repose sur une membrane suspendue sur les transistors d'actuation dont elle est séparée par un gap d'air et maintenue par des plots isolants

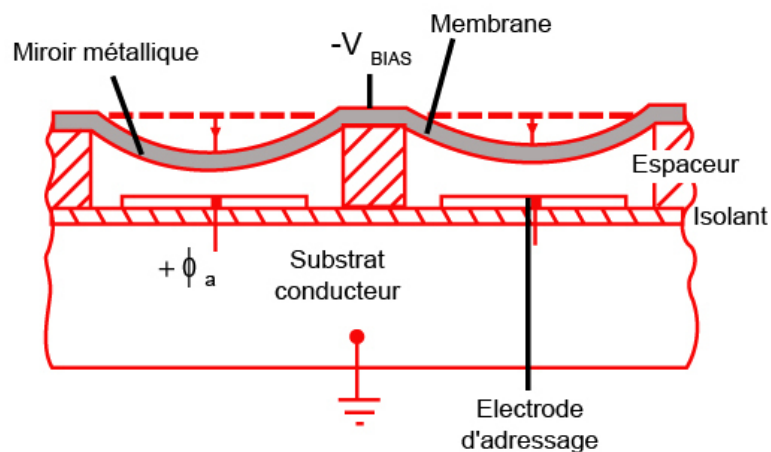


Image 28b

- les SLM★ à poutre mono-encastree : chaque micro-miroir métallique est déposé sur une poutre mono-encastree dont la flexion est commandée par un transistor

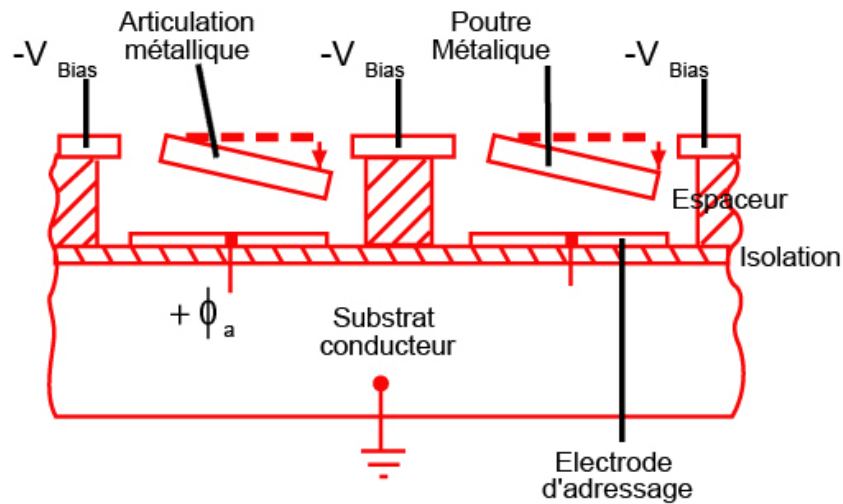
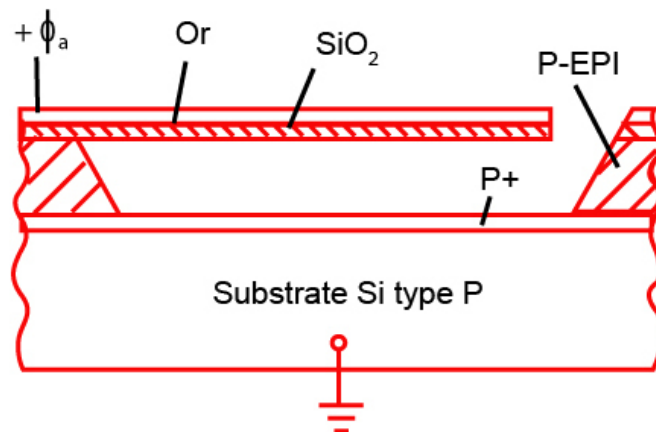


Image 28c

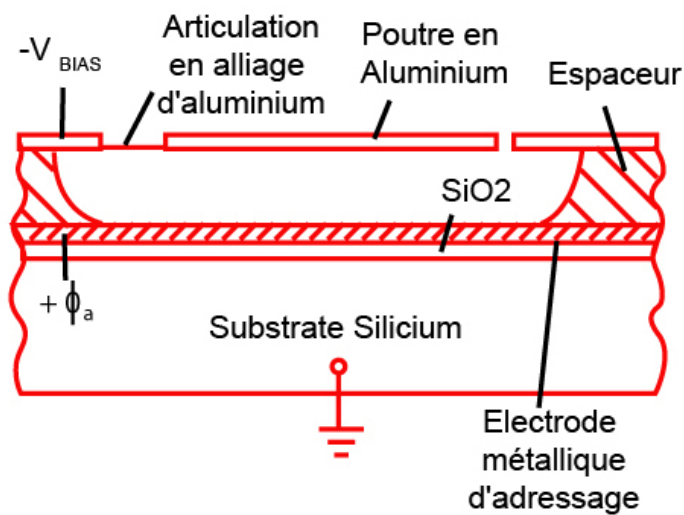
- les SLM★ à torsion : chaque micro-miroir est déposé sur une poutre bi-encastree dont la torsion est commandée par un transistor

Dans ces deux derniers cas, les miroirs ont été réalisés selon les dispositifs :

- soit par dépôt d'un film d'or sur des poutres de silice micro-usinée par gravure anisotrope sèche,
- soit par dépôt d'un film d'aluminium sur des poutres d'alliage d'aluminium micro-usinée par gravure plasma.



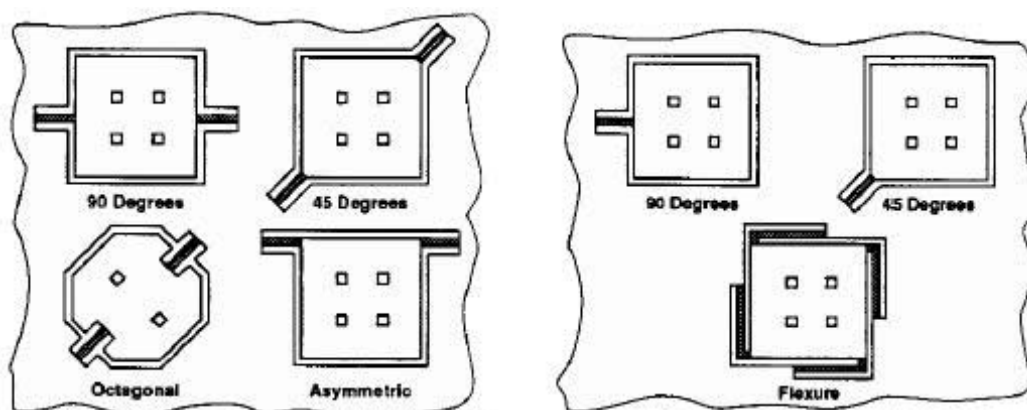
(a) Poutre monocostruite réalisée par gravure humide anisotrope



(b) Poutre monoencastree réalisée par centrifugation sur un espaceur et gravure plasma

Image 29

On peut comparer les différentes configurations possibles sur la figure ci-dessous :



- **Poutre de torsion**
 - Le système à poutre de torsion symétrique présente une modulation d'amplitude dominante

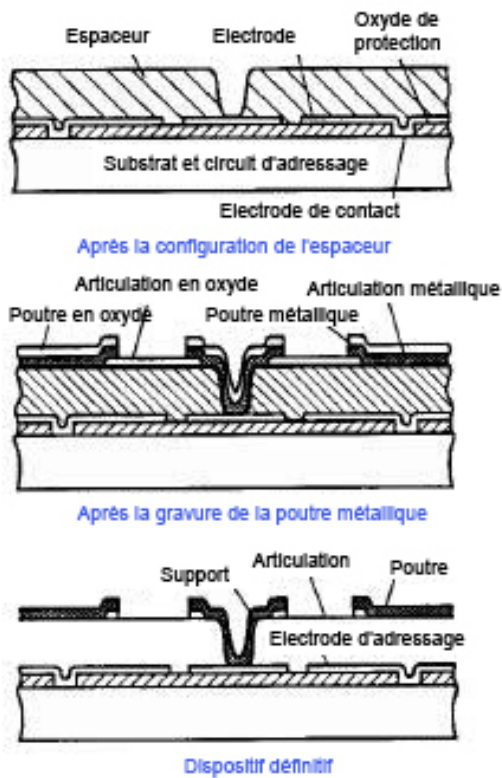
- **Poutre monoencastrée**
 - Le système à flexion/balancement présente la modulation de phase dominante

Image 30

2. La fabrication

Nombre d'éléments mobiles	0,5 à 1,2 million
Mouvement mécanique	Contacts discret ou « collages »
Durée de vie attendue	450 billion de contacts par élément mobile
Tension d'adressage	Limité à 5 V pour la technologie CMOS
Matériau des éléments mécaniques	aluminium
Procédé de fabrication	Basse température, pulvérisation, gravure plasma
Couche sacrificielle	Couche organique, gravure sèche, élimination du wafer
Séparation des parties inutiles	Après élimination de la couche sacrificielle
« Packaging »	Optique, hermétique, isolation thermique
Test	Electro-optique rapide avant la séparation des parties inutiles

Caractéristiques principales et cahier des charges



- Procédé de micro-usinage de surface de l'alliage d'aluminium.

- Couche sacrificielle de 2-3 μm en matériau organique.

- Articulation: alliage d'aluminium, typiquement 50 à 100 nm d'épaisseur.

- Miroir: alliage d'aluminium, typiquement 300 à 500 nm d'épaisseur.

- Libération des structures par gravure plasma isotrope sèche.

Image 31 - Procédé de fabrication des DMD « de base »

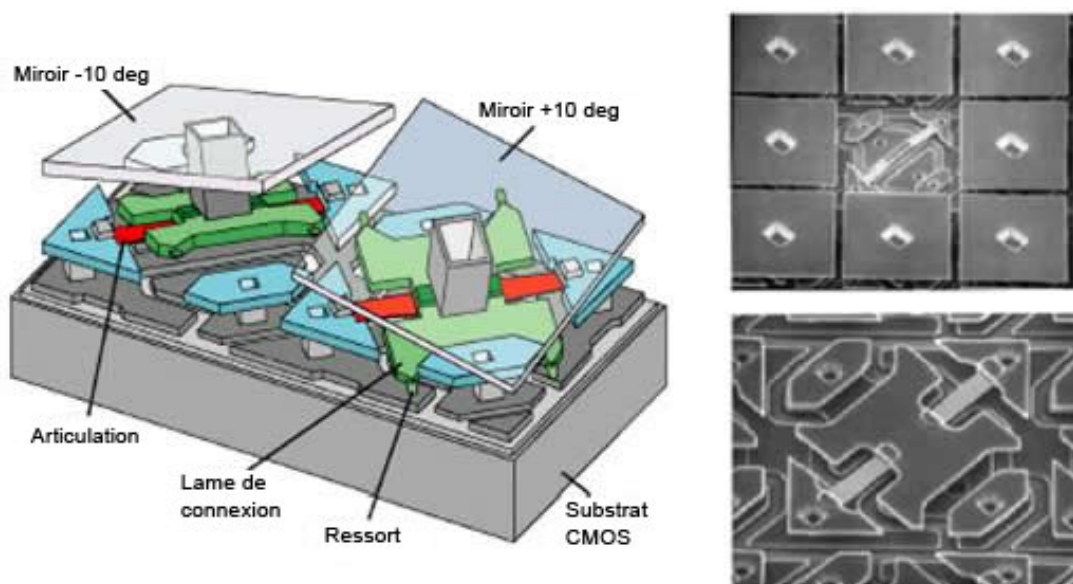


Image 32 - Procédé de fabrication des DMD « évolués »

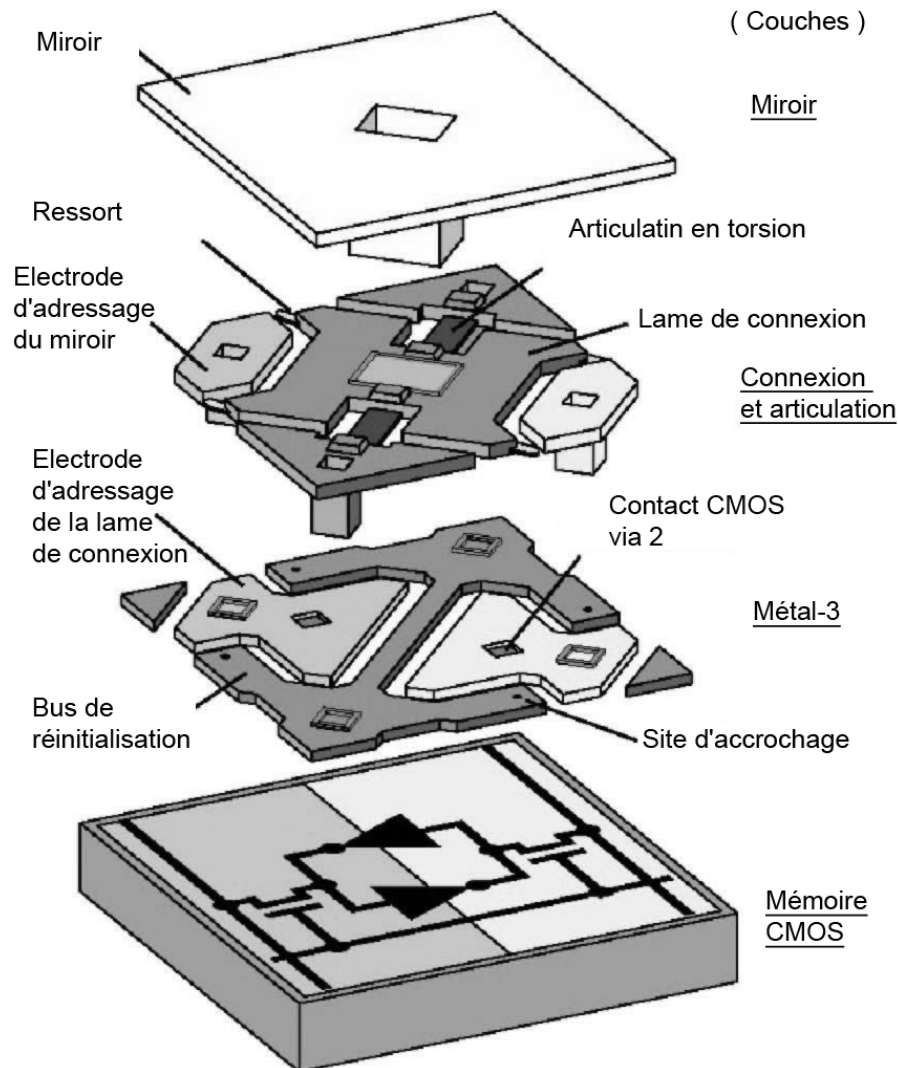


Image 33 - Structure détaillée:

On utilise de l'aluminium plutôt que du silicium polycristallin pour réaliser la structure et que celle-ci soit compatible avec les technologies CMOS.

Le masquage de la couche sacrificielle est réalisé avec une résine photosensible durcie aux rayonnements UV et la gravure est réalisée par voie plasma sèche.

On utilise des alliages d'aluminium pour améliorer les performances :

- les miroirs en aluminium contiennent une petite quantité de cuivre et de silicium;
- les pivots en alliage d'aluminium peuvent contenir jusqu'à 0,2% de titane et 1% de silicium.

La superstructure des DMD★ est construite sur le substrat constitué par le circuit de mémoire CMOS.

L'ensemble de la structure nécessite 6 niveaux de masquage, selon le schéma ci-dessous :

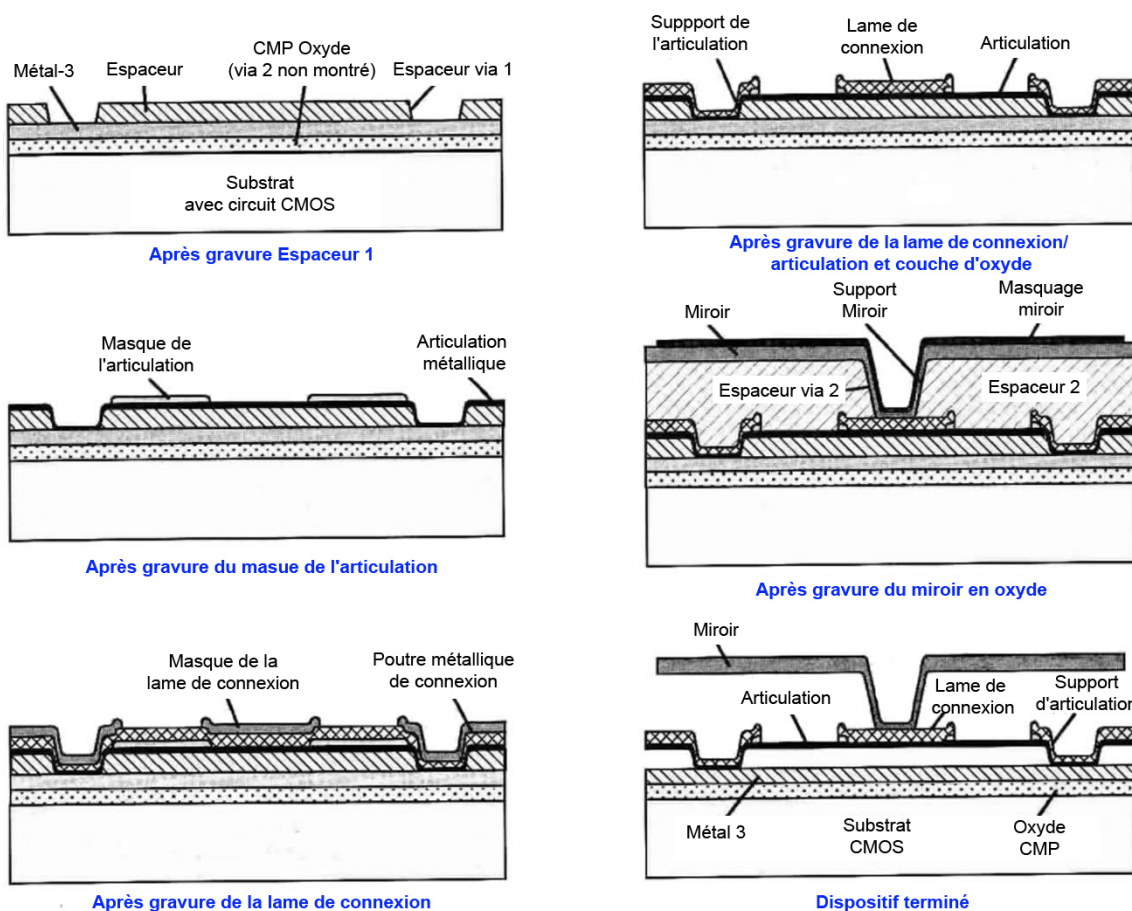


Image 34

3. Analyse du fonctionnement

Schéma de principe dans le cas d'un micro-miroir pivotant en torsion (modèle des DMD★ « Digital Micromirror Devices » fabriqués par Texas Instruments) :

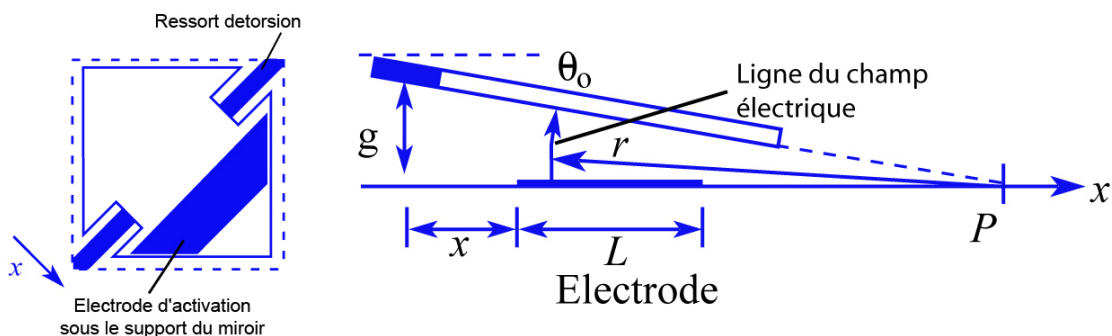


Image 35 - Schéma de principe dans le cas d'un micro-miroir pivotant en torsion

$$W(\theta_o) = \frac{1}{2} CV^2$$

$$C = \frac{Q}{V}$$

$$\Phi(\theta) = V\left(1 - \frac{\theta}{\theta_0}\right)$$

$$\vec{E} = \frac{V}{r\theta_0} \hat{\theta}$$

$$Q = \int_{\text{electrode}} \epsilon_0 \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

$$Q = \int_{\text{electrode}} \epsilon_0 \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{\epsilon_0 V}{\theta_0} \int_{P-(x_1+L)}^{P-x_1} \frac{w}{r} dr = \frac{\epsilon_0 V w}{\theta_0} \ln\left(\frac{P-x_1}{P-(x_1+L)}\right)$$

Si on suppose que la largeur w du miroir est constante alors :

$$Q = \frac{\epsilon_0 V w}{\theta_0} \ln \frac{1 - \left(\frac{x_1}{g}\right) \tan \theta_0}{1 - \left(\frac{x_1+L}{g}\right) \tan \theta_0}$$

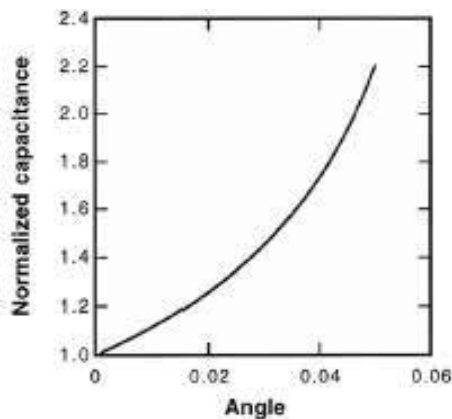
avec

$$P = \frac{g}{\tan \theta_0}$$

d'où la capacité

$$C = \frac{Q}{V}$$

On constate que la courbe représentant C en fonction de l'angle θ peut être approchée par un polynôme de degré 3 dont on va déduire la position d'équilibre stable et la tension d'actuation :



Cubic polynomial fit of capacitor:

$$C(\theta_0) = C(0) \cdot (1 + a_1 \theta_0 + a_3 \theta_0^3)$$

$$W^*(\theta_0) = \frac{C(0)V^2}{2} \cdot (1 + a_1 \theta_0 + a_3 \theta_0^3)$$

$$\tau = -\frac{\partial W^*(\theta_0)}{\partial \theta_0} = -\frac{C(0)V^2}{2} (a_1 + 3a_3 \theta_0^2) = k_\theta \theta_0$$

$$\theta_0 = -\frac{k_\theta}{3a_3 C(0)V^2} \pm \sqrt{\left(\frac{k_\theta}{3a_3 C(0)V^2}\right)^2 - \frac{a_1}{3a_3}}$$

Real solution

$$\left(\frac{k_\theta}{3a_3 C(0)V^2}\right)^2 \geq \frac{a_1}{3a_3}$$

Pull-in Voltage

$$V_{PI} = \left(\frac{k_\theta}{3a_1 a_3 C^2(0)}\right)^{\frac{1}{4}}$$

Image 36

De même un modèle mécanique simple permet d'obtenir les autres paramètres électromécaniques du mouvement de pivotement du miroir :

Angle normalisé

$$\tau_a = \int_b^{L'} x \cdot \frac{\epsilon \cdot V_a^2}{2} \cdot \frac{1}{(z_0 - z)^2} dx$$

$$\tau_a = \frac{\epsilon \cdot V_a^2}{2} \cdot \frac{W}{\tan^2 \theta_M} \left\{ \frac{1}{\alpha^2} \left[\ln(1 - \alpha\beta) + \frac{\alpha\beta}{1 - \alpha\beta} \right] \right\}$$

$$\alpha = \frac{\tan \theta}{\tan \theta_M} \quad \text{Angle normalisé}$$

$$\beta = \frac{L'}{L} \quad \text{Charge normalisée}$$

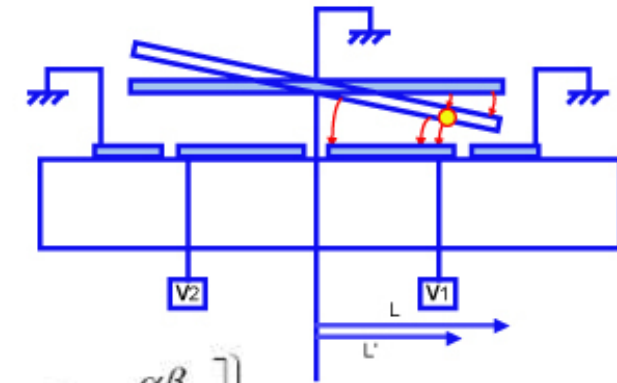


Image 37

dont on déduit :

- le couple de rappel : $\tau_s = -\frac{\theta}{C}$ où C désigne la constante de torsion
- la condition d'équilibre : $\tau_a + \tau_s = 0$
- et l'angle α (normalisé) solution pour une tension donnée.

Une résolution graphique permet de trouver les positions d'équilibre qui se trouvent aux intersections des courbes correspondant au couple de rappel électrostatique (capacité du condensateur) et au couple de rappel mécanique (torsion) :

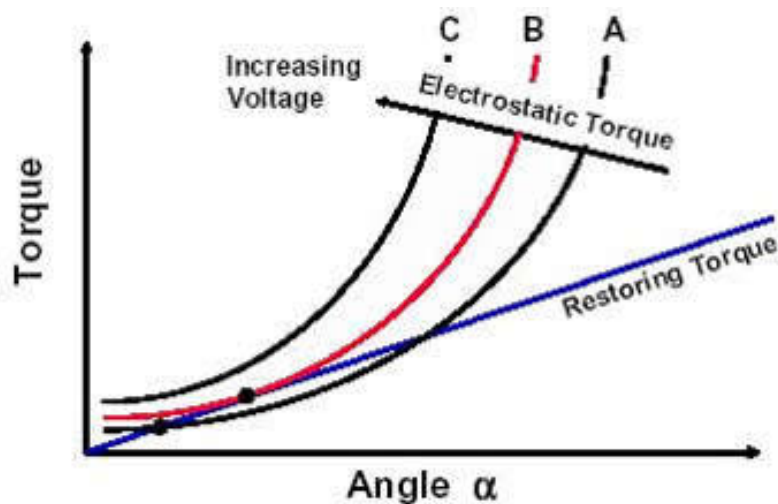
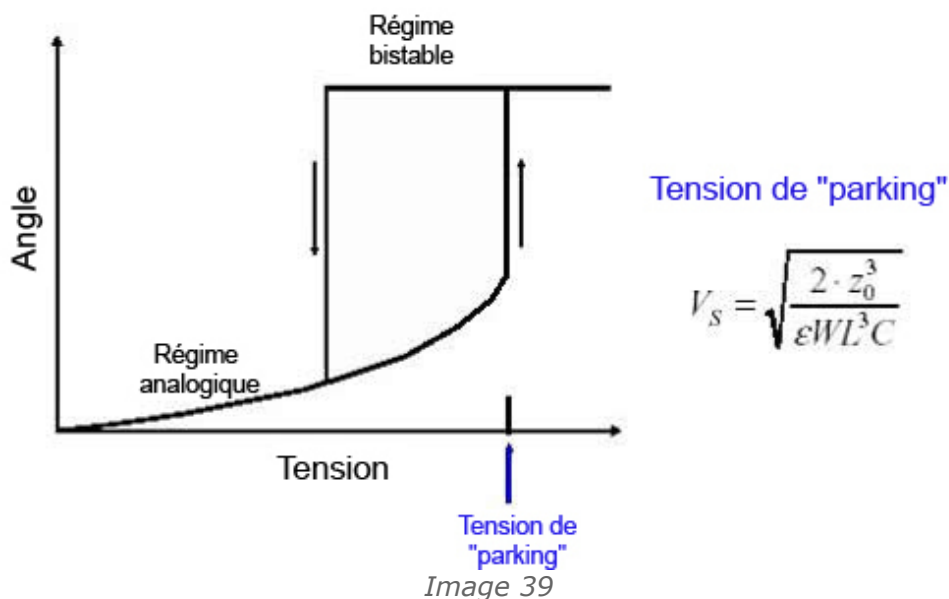


Image 38

- à basse tension (courbe A) : on observe deux points d'intersection mais seul l'angle le plus faible correspond à une position d'équilibre stable

- pour une tension critique (courbe B) : les deux courbes sont tangentes et il n'y a qu'un seul point d'intersection appelé *pull-in angle* (angle de « parking ») ou *snap-down angle*
- à tension élevée (courbe C), il n'y a pas d'intersection et aucune solution stable

On en déduit ainsi la caractéristique du fonctionnement des miroirs :



et le temps de réponse du DMD★ :

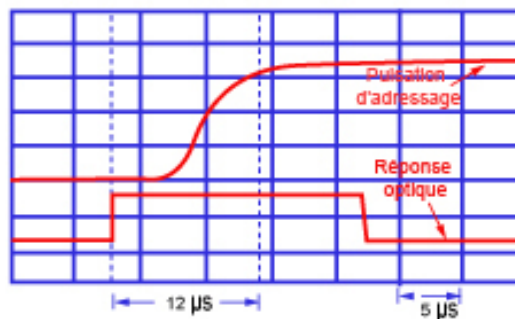
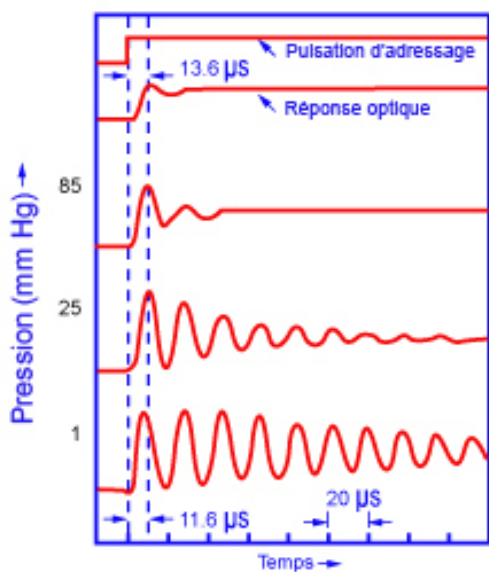


Image 40

IV.Exercices

1. Test de connaissance

Veillez répondre aux trois questions.

Question 1

[Solution n°1 p 46]

Donner les principales raisons pour lesquelles les MEMS★ sont particulièrement bien adaptés pour les interactions avec la lumière.

Question 2

[Solution n°2 p 46]

Expliquer pourquoi le silicium est le matériau le plus utilisé pour les microsystèmes.

Question 3

[Solution n°3 p 46]

Rappeler les principaux avantages des microsystèmes optiques

Solution des exercices

>Solution n°1 (exercice p. 45)

L'intérêt des MEMS pour les interactions avec la lumière tient en 4 points principaux

- la dimension des structures est de l'ordre des longueurs d'ondes optiques ce qui permet d'avoir accès des propriétés optiques remarquables
- un petit déplacement produit des effets importants à cette échelle (d'où l'intérêt pour réaliser des commutateurs optiques) :

$$\Delta d \approx \frac{\lambda}{4}$$

$$\Delta\theta \approx \text{qqs degrés}$$

- le photon n'a pas de masse

il n'est donc pas nécessaire de dispositifs d'actionneurs développant une force importante

- les MEMS★ permettent la fabrication des systèmes à grande échelle

>Solution n°2 (exercice p. 45)

Pourquoi le silicium ?

- Disponibilité du matériau et documentation considérable sur ses propriétés
- Très grande pureté du silicium monocristallin
- Multitude de processus de micro-fabrication bien établis permettant de fabriquer des dispositifs avec des précisions largement sub-micrométriques
- Anisotropie intéressante pour la micro-fabrication : on peut ainsi réaliser des gravures sélectives en utilisant les directions cristallographiques ad-hoc
- Le silicium est un matériau fortement piézo-résistif ce qui présente un intérêt pour réaliser des structures déformables
- Le silicium présente de très bonnes propriétés mécaniques par rapport aux métaux, en particulier une bonne résistance à la fatigue mécanique, des propriétés élastiques reproductibles, pas de zone plastique,...
- Technologies identiques à celles des circuits intégrés (miniturisation, fabrication collective, équipements existants, ...) ce qui permet la possibilité d'intégration des fonctions capteurs et actionneurs avec les circuits électroniques associés.

>Solution n°3 (exercice p. 45)

Avantages des microsystèmes

- Limitation de l'encombrement
- Ouverture vers des applications nouvelles (bio-médical, ...)
- les MOEMS★ requièrent des forces mécaniques très faibles
- les phénomènes optiques requièrent de très petits déplacements $-\lambda/4$
- la compatibilité avec les circuits intégrés : par l'utilisation du silicium notamment, la miniaturisation autorise l'intégration de la source, de la détection, du traitement de l'information et du conditionnement sur une même puce compatible avec les circuits intégrés
- la miniaturisation permet de réaliser des réseaux de capteurs ou de détecteurs

- la faible distance entre les éléments qui permet la réduction des effets capacitifs et l'utilisation des longueurs d'onde optiques permettent à la fois
- la réduction des temps de réponse et l'accroissement des bandes passantes la réduction des coûts de fabrication : l'utilisation des technologies issues de la microélectronique permet une fabrication collective (en parallèle à partir d'un même wafer), l'intégration de plusieurs fonctions sur une même puce et la reproduction d'un dispositif à des millions d'exemplaires à un coût moindre
- l'amélioration de la résistance mécanique du fait de fréquences de résonance très élevées et de l'utilisation dans de nombreux cas de silicium monocristallin.

Signification des abréviations

- APCVD	Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition
- CI	Circuit Intégré
- CVD	Chemical Vapor Deposition
- DMD	Digital Micromirror Devices
- Ge	Germanium
- LPCVD	Low Pressure Chemical Vapor Deposition
- MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
- MOEMS	Micro-Optical-Electro-Mechanical Systems
- MOS	Metal-Oxide-Silicon
- PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
- PVD	Physical Vapor Deposition
- RF	Radio-Fréquence
- RIE	Reactive Ion Etching
- Si	Silicium
- SLM	Spatial Light Modulator
- SOI	Silicon On Insulator
- WDM	Wavelength Division Multiplexer

Bibliographie

[Active opto-electronic components] CARENCO A., AL., *Active opto-electronic components*, Comptes-Rendus de Physique, 2003, Vol. 4.

[A design flow for MEMS] *A design flow for MEMS*, SPIE Photonics East 2000.

[A MEMS based projection system] VAN KESSEL . P.F, AL., *A MEMS based projection system*, IEEE Proceedings, 1998, Vol. 86.

[Fundamentals of Microfabrication] MADOU M., *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, Boca Raton, Florida, 1997.

[III-V semiconductors based MOEMS devices for optical telecommunications] GARRIGUES N., AL., *III-V semiconductors based MOEMS devices for optical telecommunications*, Microelectronics Engineering, 2002, Vol 61-62.

[Introduction to MEMS] *Introduction to MEMS*, Presentation au Manufacturing Modeling Lab 2004.

[Introduction to the issue on Optirical Mirco and Nana systems] SOLGAARD O., AL., *Introduction to the issue on Optirical Mirco and Nana systems*, IEEE Journal of selected topics in Quantum Electronics, 2007 March-April, Vol. 13.

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

[MEMS : fabrication, design and applications] JUDY J.W., *MEMS : fabrication, design and applications*, Journal of Smart Materials and Structures, 2001, Vol. 10, n° 6.

[MEMS for optical functionality] KIM S., AL., *MEMS for optical functionality*, Journal of Electroceramics, 2004, Vol 12.

[Micromachinery, rolling at last ?] MARSH G., *Micromachinery, rolling at last ?*, Materials Today, 2002 July/August.

[Observation of Critical Coupling in a Fiber Taper to a Silica-Microsphere Whispering-Gallery Mode System] CAI MING, PAINTER OSKAR, VAHALA KERRY J., *Observation of Critical Coupling in a Fiber Taper to a Silica-Microsphere Whispering-Gallery Mode System* (p.74-77), Physical Review Letter (Phys. Rev. Lett), 2000 Juillet, n° 85.

[Optical MEMS for Lightwave Communications] WU M.C, AL., *Optical MEMS for Lightwave Communications*, Journal of Lightwave Technologies, 2006, Vol 24, n° Iss 12.

[Optical Propagation methods for system-level modeling of optical MEMS] Kurzweg T.P., *Optical Propagation methods for system-level modeling of optical MEMS*, 170 pages, Electrical Engineering, University of Pittsburg, 2002.

[Semiconductor Nanocrystals as Fluorescent Biological Labels] BRUCHEZ MARCEL JR., MORONNE MARIO, GIN PETER, WEISS SHIMON, ALIVISATOS A. PAUL, *Semiconductor Nanocrystals as Fluorescent Biological Labels* (p.2012-2016), Science Magazine, 1998 Septembre 25, Vol.281, n° 5385.

[Short course on Optical-MEMS] *Short course on Optical-MEMS*, March American Physical Society Meeting 2001.

[Silicon as a mechanical material] PETERSEN K.E., *Silicon as a mechanical material*, IEEE Proceedings, 2002 May.

[Theoretical aspects of the luminescence of porous silicon] *Theoretical aspects of the luminescence of porous silicon* (p.11021-11036), Physical Review (Phys. Rev.), 1993 Octobre, B 48.

[Ultimate Q of Optical Microsphere Resonators] GORODETSKY M. L., SAVCHENKOV A. A., ILCHENKO V. S., *ULTIMATE Q OF OPTICAL MICROSPHERE RESONATORS* (p.453-455), Optics letters (Opt. lett.), 1996--, Vol.21, n° 7.

Webographie

[] <http://www.esiee.fr/~francaio> (consultation 07 07 2007).

[] <http://www.memscad.com> (consultation 07 07 2007).

[] <http://www.mems.com> (consultation 07 07 2007).

[] <http://www.moems.com> (consultation 07 07 2007).

[] <http://www.rsoftinc.com> (consultation 07 07 2007).

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

[] <http://www.dlp.com> (consultation 07 07 2007).

[] <http://www.europractice.com> (consultation 07 07 2007).

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

[] <http://www.stanford.edu> (consultation 07 07 2007).

[**Understanding optical communications**] *Understanding optical communications*, <http://www.redbooks.ibm.com> (consultation 07 07 2007).

[**Venus tout droit du pays des lilliputiens, les MOEMS vont envahir l'espace**] *Venus tout droit du pays des lilliputiens, les MOEMS vont envahir l'espace*, <http://www.promoptica.be/publications/moemss.pdf> (consultation 07 07 2007).