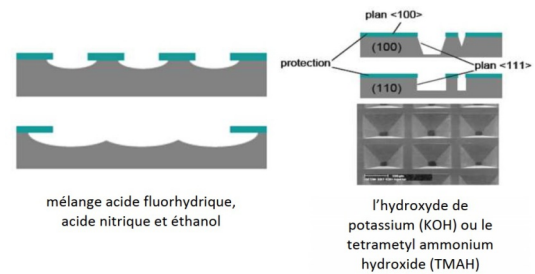


Technologies et fabrication des microsystemes



BRIXI NIGASSA Mohammed El Amine

Table des matières



Objectifs	3
Introduction	4
I - Objectifs intermédiaires du chapitre et pré-requis nécessaires	5
1. Objectifs intermédiaires du chapitre et pré-requis nécessaires	5
II - Environnement de réalisation	6
1. Taux de contamination particulière	6
2. Système de flux de nettoyage	6
3. Les modes d'actions	6
III - Techniques de réalisation des microsystemes	8
1. Les substrats Silicium	8
2. Différence entre circuit intégrés (CI) et microsystemes (MEMS)	9
3. Techniques de réalisation	9
3.1. Photolithographie	10
3.2. Techniques de dépôt en couche minces	13
3.3. La gravure	16
3.4. Assemblage	24
IV - Exercice	26
V - Exercice	27
VI - Exercice :	28
VII - Exercice :	29
Conclusion	30
Bibliographie	31
Webographie	33

Objectifs

Maintenant que nous en savons plus sur les microsystemes (chapitre 1), nous allons présenter dans ce chapitre les différentes techniques utilisées pour fabriquer ces dernier. Ainsi, l'environnement de réalisation, les techniques de dépôts et de gravure seront mis en évidence dans ce chapitre.

Introduction



Pour la réalisation des microsystèmes, il est impératif d'éviter dans l'air ambiant la présence de particules de dimensions voisines ou supérieures à celles des motifs à réaliser. Ces particules peuvent introduire des défauts rédhibitoires au cours des étapes d'élaboration des micro et nano-dispositifs. Les tolérances admises pour la propreté de l'air sont donc particulièrement drastiques, et supérieures à celles que l'on rencontre dans le domaine médical ou pharmaceutique (taille d'une bactérie = l'ordre du micromètre, d'un virus= dixième de micromètre donc des tailles bien supérieures au nanomètre). Donc, une centrale de micro-nanotechnologies regroupera des locaux ultra-propres, à taux contrôlé de contamination particulaire, locaux que l'on appelle communément salle blanche.

Objectifs intermédiaires du chapitre et pré-requis nécessaires



1. Objectifs intermédiaires du chapitre et pré-requis nécessaires

Les objectifs intermédiaires ainsi que le niveau à atteindre pour chacun d'eux dans ce chapitre sont présentés comme suit :

- Connaître l'environnement de réalisation des microsystèmes. Il s'agira d'introduire et donner quelques notions sur les salles blanches (savoir).
- Différencier entre les techniques de réalisation pour un circuit-intégré (microélectronique) et un microsystèmes. Il s'agira ici de mettre l'accent sur les différences mais aussi sur les techniques de réalisation communes aux microsystèmes et microélectronique (savoir).
- L'étudiant sera capable d'identifier à partir d'un cahier de charge demandé les techniques nécessaire pour réaliser un microsystèmes (savoir-faire).
- Déterminer la compatibilité entre les matériaux composant un microsystème (savoir-faire).
- Savoir respecter les règles de sécurité en salle blanche (savoir-être).

Pour suivre ce chapitre, l'étudiant doit avoir assimilé ce qui a été présenté lors du chapitre 1, afin de prendre conscience de l'intérêt d'utiliser les outils et techniques présentées lors de ce chapitre.

Environnement de réalisation



1. Taux de contamination particulaire

Le taux de contamination particulaire est exprimé en nombre de particules de dimension donnée par unité de volume, peut être défini par le rapport entre le nombre de particules engendrées par minute et le débit d'air soufflé en m³/min. Ces valeurs de taux sont spécifiées par des normes internationales (les plus répandues étant les « classes » de propreté définies par les normes U.S. Federal Standard et ISO). Par exemple, la classe U.S. Federal Standard no 209B « 100 » ou classe ISO « 5 » contient 100 particules de 0,5 µm par pied cube ou 3 520 par mètre cube.

2. Système de flux de nettoyage

A chaque fois que les échantillons sont traités à l'air libre, préserver leur surface de toute contamination impose un environnement sous flux laminaire, garant d'une haute propreté car permettant une extraction très efficace des particules. Toutes les opérations de lithographie requièrent un degré de propreté supérieur à celui des autres opérations car, situées en amont, les défauts éventuels peuvent se propager lors des étapes ultérieures de fabrication. Les opérations de gravure et de dépôt doivent néanmoins être effectuées en environnement propre, car les échantillons sont à l'air libre pendant les phases de transfert.

3. Les modes d'actions

Il faut alimenter les zones concernées en air purifié par une suite de filtrages à plusieurs niveaux de rétention ; diluer et retirer les contaminations engendrées dans les zones protégées grâce à un flux d'air permanent ; opposer une barrière vis-à-vis des contaminants extérieurs en établissant dans les zones concernées une « surpression » proportionnelle à leur classe de propreté; et surtout limiter les sources de contamination. L'accès à ces zones pour une personne se fait suivant un protocole bien spécifique qui est présenté sur la figure suivante.

Procédure d'entrée en Salle Blanche

Équipez-vous de sur-chaussures avant d'entrer dans le vestiaire. Prenez soin de marcher sur le tapis adhésif anti-poussières	Équipez-vous d'une charlotte et d'un masque . Si vous êtes amenés à entrer en salle ISO5, munissez-vous d'une paire de lunettes	Prenez une combinaison neuve dans le distributeur ou utilisez votre combinaison disposée sur le cintre repéré à votre nom	Évitez de mettre l'extérieur de la combinaison en contact avec des surfaces sales (bancs, sol...)	Enfilez la combinaison en veillant à ce qu'elle ne touche pas le sol , ceci en conservant vos sur-chaussures	Remontez la fermeture éclair jusqu'à masquer votre cou. Vérifiez que la partie basse est bien fermée . Si besoin, utilisez l'adhésif en rabat
Asseyez-vous sur le banc et équipez-vous de sur-bottes . Veillez à ce que vos pieds ne touchent pas le sol du vestiaire et à bien recouvrir le bas de la combinaison	Une fois équipé de sur-bottes, passez les pieds au-dessus du banc. Marchez sur le tapis adhésif anti-poussières	Passez chaque élastique de maintien des manches de la combinaison, autour de vos pouces, puis équipez-vous de gants à la taille appropriée	Vérifiez devant le miroir que l'ensemble de la combinaison ne laisse pas de zone non couverte. Vérifiez l' intégralité de la combinaison	Si vous ressemblez à cela OK !	Vous êtes maintenant autorisés à entrer
Asseyez-vous sur le banc pour retirer les sur-bottes	Retirez vos gants. Jetez les à la poubelle.	Dézippez votre combinaison	Retirez votre combinaison en évitant que l'extérieur de celle-ci soit en contact avec des surfaces sales (bancs, sol...)	Rangez la combinaison et vos sur-bottes sur votre cintre ou jetez, à la poubelle, les vêtements coupés, sales ou percés.	Jetez masque et charlotte à la poubelle. Sortez du vestiaire et retirez vos sur-chaussures

Procédure d'entrée/sortie en salle blanche (source Institut de Recherche XLIM-Université de Limoges-France)

La purification de l'air ambiant nécessite l'utilisation des filtres à trois niveaux :

- Un étage de filtration relativement grossière (filtration gravimétrique) en entrée ;
- Un étage de filtration plus poussée (filtration opacimétrique) ;
- Un étage de filtration absolue en sortie.

Techniques de réalisation des microsystèmes

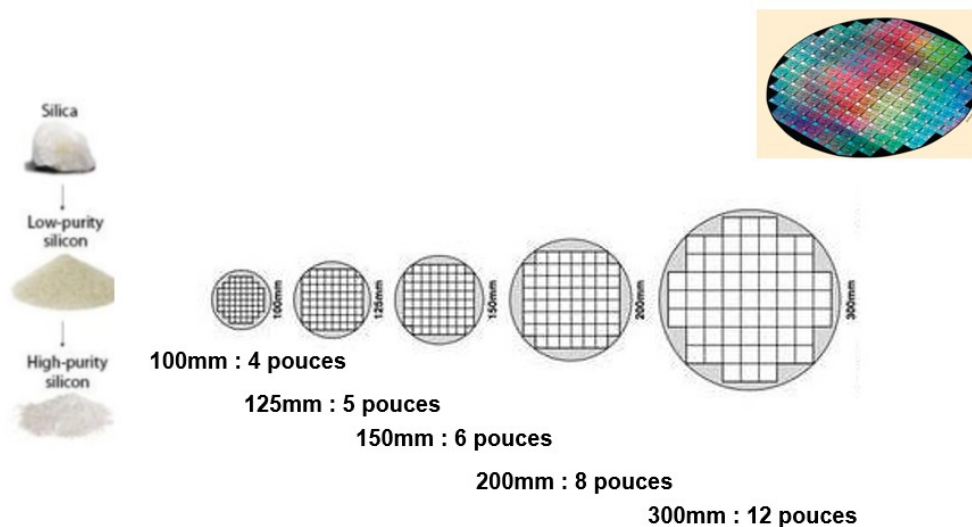
III

1. Les substrats Silicium

Le silicium est l'un des matériaux les plus naturellement abondants. Même s'il y a meilleur semi-conducteur que celui-ci comme le Germanium, c'est le prix de production des plaquettes (wafer) qui en fait le matériau le plus façonné en microélectronique et en microtechnologie. La fabrication de ces plaquettes passe par une cristallisation en forme cylindrique puis la découpe en plaquettes (slicing).

Cf. "How do they make Silicon Wafers and Computer Chips ?"

Les prédictions de la loi de Moore ont permis l'élévation des diamètres des wafers pour gagner en nombre de composants. Passés de wafers de 50 mm (2 pouces) années 1970 à des surfaces de 100 mm (4 pouces) au début des années 75, 150 mm (6 pouces) à la fin des années 80, 200 mm (8 pouces) au début des années 90 et 300 mm (12 pouces aussi nommés pizza-pie) années 2000.



Du sable au "Pizza-Pie"

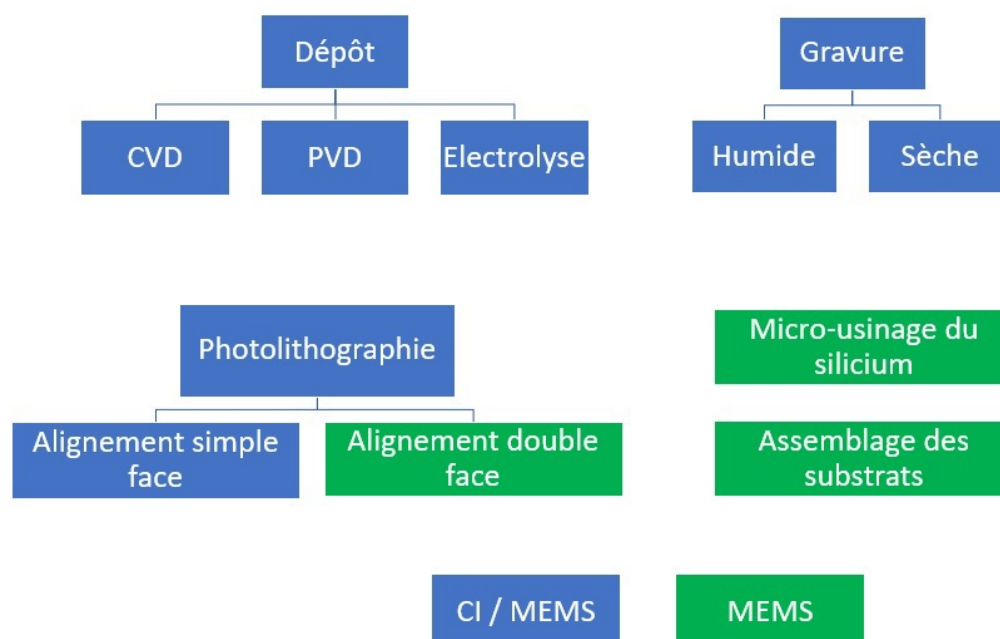
La réalisation des microsystèmes se base sur les trois classes de procédés fondamentales, dont :

- La photolithographie,
- Les dépôts en couches minces,
- Les gravures

Avant d'entamer les définitions de ces techniques de réalisation, nous donnerons la relation entre technologie microsystèmes et circuits intégrés.

2. Différence entre circuit intégrés (CI) et microsystèmes (MEMS)

L'origine des techniques de fabrication de microsystèmes s'est imprégnée des techniques de réalisation des circuits intégrés (CI).



Organigramme faisant apparaître les points en commun entre technologie de CI et MEMS

La compatibilité entre ces deux technologies n'est pas réciproque. La mise en œuvre des technologies microélectroniques est si pointue qu'il n'est pas recommandé d'en modifier les règles pour obtenir leur compatibilité avec les technologies microsystèmes. Il faudra, le plus souvent, se limiter à choisir des substrats différents, à leur appliquer sans modification le cycle technologique habituel de la microélectronique, et à compléter par des technologies nouvelles ne modifiant aucunement les caractéristiques des opérations microélectroniques déjà réalisées. Cela suppose de travailler à basse température (inférieure à 400°C) et d'utiliser des agents chimiques peu agressifs.

La conception des microsystèmes se trouve toujours devant le choix d'une option «monolithique» ou d'une option «assemblée» dite hybride. L'option monolithique est évidemment la plus attractive lorsque les contraintes de réalisation supplémentaire des opérations propres aux microsystèmes ne dégradent pas trop les rendements de production et n'impliquent pas des augmentations de coûts prohibitifs par l'accroissement des surfaces introduites par l'insertion des composants microsystèmes. L'option hybride s'impose le plus souvent, au moins dans un premier temps. Elle permet de se libérer des contraintes technologiques et de réutiliser des savoir-faire déjà éprouvés avec, toutefois, des risques renforcés au niveau de la maîtrise des interconnexions et du conditionnement terminal.

3. Techniques de réalisation

On dénombre trois principaux types d'opération technologique :

- La lithographie optique ou électronique ;
- Les procédés physiques de gravure ;
- Les dépôts de matériaux sous forme de couches minces.

3.1. Photolithographie

La photolithographie sert, avec la gravure, à définir les motifs des différentes couches. Les dimensions critiques des motifs des microsystemes sont le plus souvent nettement plus élevées que celles de la microélectronique : quelques micromètres en général contre des dimensions submicroniques. La complexité des étapes de photolithographie vient donc plus des topologies importantes qui peuvent être présentes sur les plaques (et des épaisseurs de résine qui sont alors nécessaires) que des dimensions critiques.

Lors de la fabrication des microsystemes, on peut être amené à réaliser des motifs sur les deux faces du substrat, ce qui nécessite l'utilisation d'équipements spécifiques permettant un alignement entre la face avant et la face arrière. La précision d'alignement entre les deux faces est généralement de l'ordre de quelques micromètres.

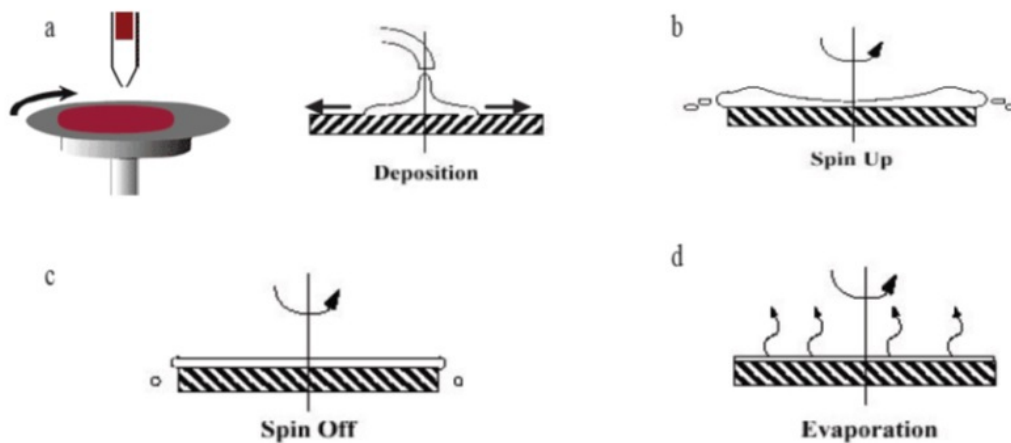
Une étape de photolithographie exige trois étapes primordiales :

- Dépôt du polymère ou lamination du film.
- Système optique: masque projection, électronique...
- Développement.

3.1.1. Dépôt de polymère ou lamination du film

Il existe plusieurs méthodes de dépôt de polymères, dans le cas des polymères photosensibles le choix de la méthode dépendra de son épaisseur et de ses propriétés physiques (résistance thermique, mécaniques, qualité de surfaces, résistance à la gravure,...). Dans ce cas, nous pouvons énumérer ces techniques :

1. Dépôt par tournette : souvent appelé spin coating et c'est la plus utilisée en microélectronique et en microtechnologie pour les résines photosensibles. Les étapes de cette technique sont données dans la figure suivante.

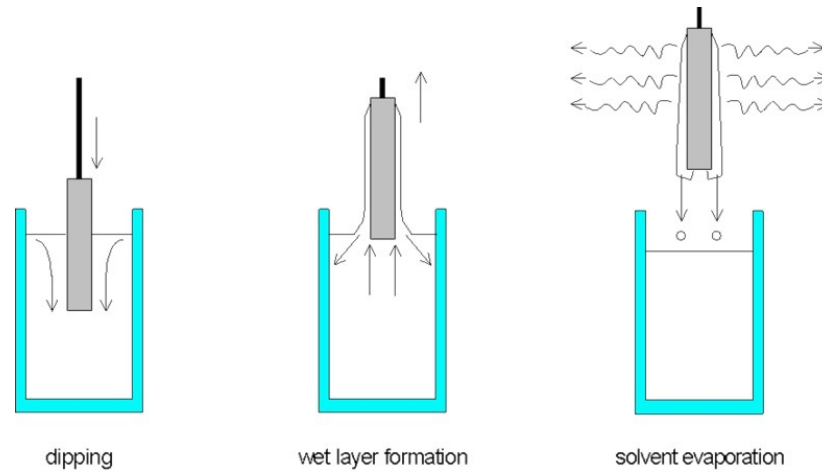


Étapes de dépôt de résine par tournette (Spin-coating)

Pour cette technique le polymère déposé doit être sous forme liquide et homogène. Elle consiste à déposer une grosse goutte au centre de la plaquette (wafer) et après une première accélération qui permettra d'étaler la goutte sur toute la surface, la tournette fonctionnera à vitesse constante (les vitesses de rotations peuvent aller de 500 tour/ min jusqu'à 5000 tour/min) pour donner l'épaisseur uniforme au film photosensible et s'en suit une

étape d'évaporation pour éliminer le reste du solvant de la résine. Chaque résine commerciale est caractérisée avec sa spin curve qui donne l'épaisseur du film pour chaque vitesse de rotation. Un inconvénient majeur de cette technique est le dépôt de film épais ($> 100\mu\text{m}$). Parfois cela nécessite le dépôt en plusieurs couches pour remédier à cet inconvénient.

2. Le dip coating : cette technique est basée sur le principe de tremper le wafer dans le liquide à déposer. Donc, ça nécessite une grande affinité entre la surface du wafer et le liquide à déposer.



Étapes de dépôt de résine par dip-coating

Cette technique est utilisée pour quelques dépôts en microfluidique par exemple pour les systèmes auto-assemblés. L'inconvénient de cette technique est qu'elle nécessite un état de surface spécifique lié au liquide déposé et entraîne systématiquement une contamination de la face arrière de la plaquette.

3. Le laminage : cette technique est utilisée pour les polymères qui ont déjà une forme en film plastique c'est-à-dire caractérisés par une faible température de transition vitreuse et ne peuvent être formulés en forme liquide à température ambiante.

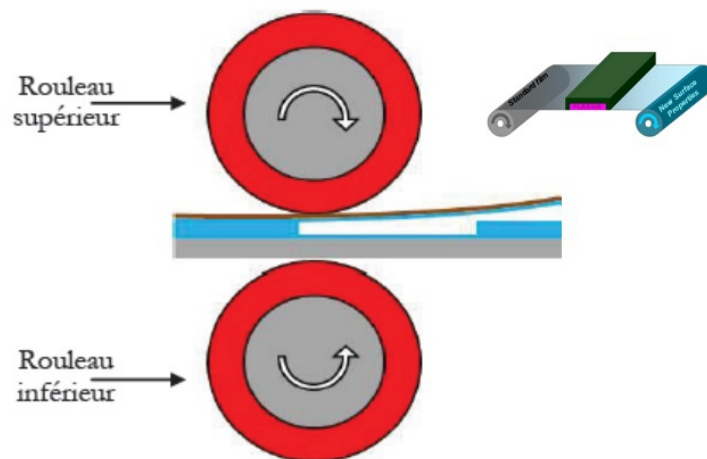
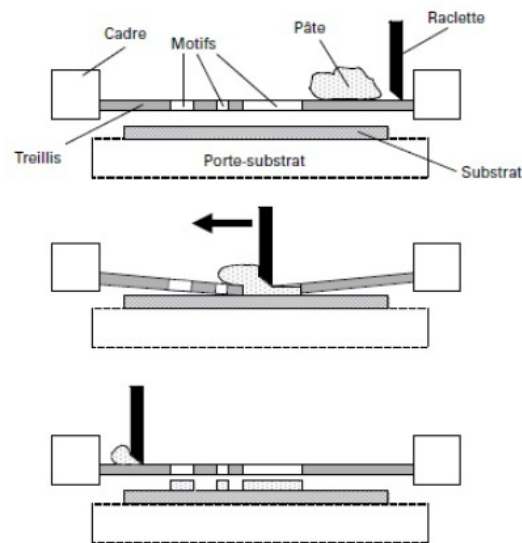


Schéma de lamination d'un film sur un wafer.

Cette technique reste limitée pour des films épais ($>100\mu\text{m}$) et ne peut être utilisée pour des designs nécessitant une grande résolution.

4. Sérigraphie c'est une technique qui a eu beaucoup de développement ces dernières années vu la demande de polymères épais. Elle utilise généralement des pâtes (liquides très visqueux) qui sont aplatis et définis selon un masque bien déterminé et spécifique au design étudié.



Étapes de dépôt de résine par sérigraphie.

Cette technique a beaucoup souffert de l'inconvénient d'uniformité des films ; les derniers développements ont permis de remédier à ce problème.

Remarque

Il existe une autre technique de dépôt qui s'appelle spray-coating c'est une technique alternative au spin-coating. Elle nécessite des faibles vitesses de rotation et permet d'obtenir des films uniformes pour des surfaces composés de cavités.

a) Systèmes optiques

Pour définir les motifs dessinés sur le masque, on besoin d'énergie sous forme de photons ou rayonnement électromagnétique. La course prédite par la loi de Moore à exiger d'utiliser les rayons X pour la lithographie électronique pour gagner en précision, en résolution et par conséquent en espace et en nombre ce composant. Vu la taille des microsystèmes qui s'étale à partir des $100\mu\text{m}$ jusqu' au mm, elle ne nécessite pas une grande résolution comme celle voulu pour les circuits intégrés. Donc, c'est l'énergie ultraviolette qui est utilisé pour l'insolation des résines photosensibles. Généralement c'est les lampes à mercure qui sont utilisés qui peuvent donner des résolutions de l'ordre de $0,4 \mu\text{m}$. Néanmoins, on utilise à la fois des résines positives et négatives. Sachant que c'est les parties à développer qui sont insolées dans les résines positives contrairement aux résines négatives (figure ci-dessous).

Remarque

Lors de l'étape de développement, on utilise généralement des solvants basiques qui sont formulés en fonction de la structure chimique du polymère.

3.2. Techniques de dépôt en couche minces

Il existe trois modes principaux de dépôt de couches, en général utilisables en électronique : sous vide, par dépôt chimique, par sérigraphie et cuisson. Seuls les deux premiers correspondent aux couches minces.

Il existe plusieurs méthodes de dépôt des couches minces, adaptées chacune à un type de couche. Pour un matériau donné, il peut exister plusieurs méthodes valables, et le choix parmi celles-ci peut dépendre des problèmes de compatibilité (possibilité de chauffer ou non le substrat, nature des couches sous-jacentes déjà déposées), ainsi que des coûts de dépôt et des performances souhaitées en termes de dérives dans le temps et en température.

Les principales méthodes disponibles sont :

1. Les méthodes de dépôt par voie physique ou PVD (physical vapor deposition), parmi lesquelles :

- L'évaporation sous vide,
- La pulvérisation cathodique,
- Le canon à électrons,
- Le dépôt laser pulsé (DLP).

2. Les méthodes de dépôt par voie chimique ou CD (chemical deposition), parmi lesquelles :

- Le dépôt chimique en phase vapeur (CVD),
- Le dépôt à basse pression (LPCVD),
- Le dépôt assisté plasma (PECVD),
- L'oxydation anodique,
- Les dépôts par immersion dans un liquide (chimiques ou électrolytiques),
- Les dépôts pyrolytiques.

Dans ce qui suit nous allons donner un aperçu sur quelques techniques de dépôts.

3.2.1. Évaporation thermique sous vide ou par effet Joule

Elle consiste à chauffer le matériau jusqu'à obtenir sa fusion puis son évaporation, ou parfois son évaporation directe sans passage par la phase liquide. Cette dernière méthode est alors appelée sublimation sous vide. La manière dont un corps chauffé s'évapore sous vide dépend de plusieurs facteurs dont la température, la pression ambiante et d'un paramètre intrinsèque qui est la pression de vapeur. Si, à la température de fusion du corps (laquelle évolue en fonction de la pression ambiante), cette pression ambiante est largement inférieure à la pression de vapeur du corps, alors celui-ci passe directement de l'état solide à l'état gazeux sans passer par une phase liquide. Il y a sublimation, ce qui est particulièrement pratique pour certains métaux qui peuvent ainsi être évaporés en les chauffant directement par effet Joule, sans avoir à faire appel à un creuset. Pour obtenir une vitesse d'évaporation suffisante, le matériau doit être chauffé jusqu'à ce que sa pression de vapeur atteigne environ 1 Pa. Les atomes ou les molécules éjectés de la surface transitent ensuite jusqu'au substrat sur lequel ils se condensent.

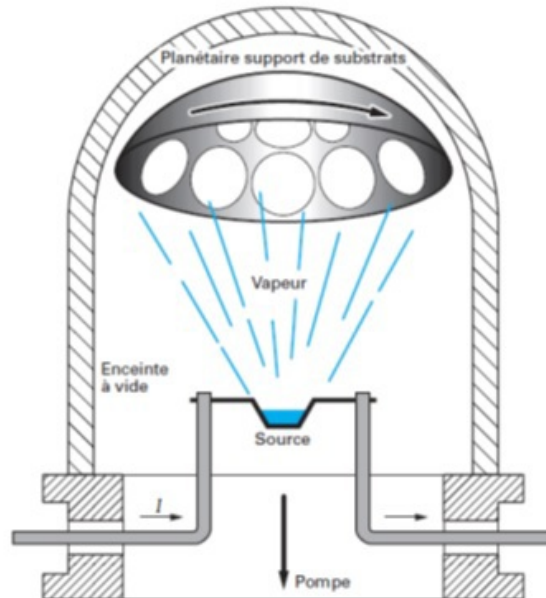


Schéma de représentation de dépôt d'évaporation sous vide.

Les variantes de la méthode de chauffage direct par effet Joule sont :

- L'usage de creuset ;
- Le chauffage par canon à électrons ;
- L'évaporation dite réactive dans laquelle un gaz réactif est introduit dans l'enceinte pour favoriser la formation de dépôts d'oxydes ou de nitrures.

Le procédé est très ancien, il a fait ses preuves et dépose relativement vite (quelques centaines à quelques milliers d'angströms par minute). Cependant, on lui reproche :

- Une limitation en épaisseur des couches (problème du pelliculage) ;
- La maîtrise difficile des dépôts de matériaux combinés (alliages par exemple)
- Des taux d'impureté qui restent importants et aux limites de l'acceptable ;
- La nature polycristalline des dépôts, dans les cas où on cherche à réaliser des éléments actifs.

3.2.2. Pulvérisation cathodique

Autrement appelé ionoévaporation, ou projection moléculaire, ou encore de l'anglais sputtering, ce procédé de dépôt utilise l'énergie cinétique (~ 1 keV) d'ions créés par une décharge électrique dans un gaz (argon par exemple) à faible pression ($\sim 10^{-2}$ torr), pour obtenir la rupture des liaisons entre les atomes superficiels du corps à déposer (cible) et les atomes sous-jacents de ce même corps, sur une dizaine de couches environ. Les atomes arrachés de la cible, dont l'énergie cinétique moyenne peut atteindre plusieurs électronvolts (contre environ 0,15 eV dans le cas de l'évaporation thermique), sont projetés sur le substrat intercalé sur leur parcours. Leur énergie est alors suffisante pour provoquer une pénétration plus profonde et un accrochage sur des sites d'énergie minimum. C'est un gage de bonne adhérence de la première couche sur le substrat et d'une certaine organisation de la couche déposée.

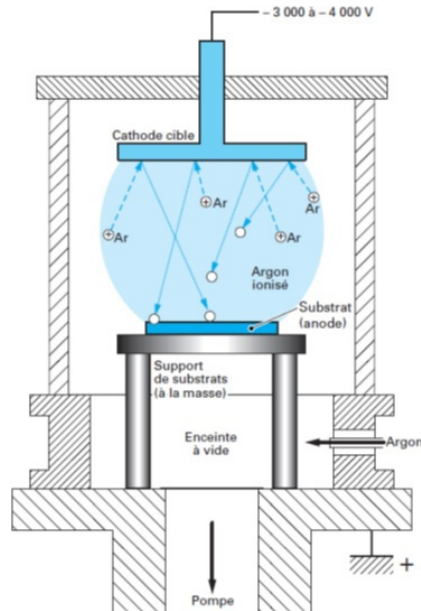


Schéma de représentation de dépôt par pulvérisation cathodique.

La méthode présente d'autres avantages :

- Une bonne uniformité d'épaisseur des couches formées ;
- Un assez bon rendement en matière déposée ;
- Elle convient bien au dépôt de substances réfractaires ;
- Elle se prête bien au dépôt de corps composés et d'alliages.

Ses inconvénients, car il y en a, sont :

- Une faible vitesse de dépôt (environ une couche atomique par seconde) ;
- Une certaine difficulté à obtenir des couches très pures, en raison du travail dans un gaz ionisé.

3.2.3. Techniques CVD

On utilise la réaction d'un composé gazeux du corps à déposer (généralement, un composé halogéné) avec un gaz réducteur (souvent l'hydrogène). Une transition entre phase gazeuse et phase solide se produit lors de la réaction chimique, au voisinage de la surface du substrat. Le résultat est une adsorption et une réaction chimique à la surface, qui génèrent des atomes libres. Ces atomes ont une mobilité de surface qui leur permet de trouver les sites de croissance. Les produits volatils de la réaction sont désorbés. Le type de dépôt (amorphe, polycristallin ou monocristallin) est fonction de la température et du type de substrat.

Un exemple typique est le dépôt de silicium épitaxial utilisé pour la réalisation des semi-conducteurs. Un mélange d'hydrogène et du composé à réduire, très souvent du silane SiH_4 , balaye un suscepteur (ou porte-substrats) porté à haute température ($> 1\,000^\circ\text{C}$) dans un tube en quartz ou réacteur CVD. Le corps réduit par l'hydrogène, en l'occurrence le silicium, se dépose sur les substrats à des vitesses relativement importantes ($0,1$ à $5\ \mu\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$).

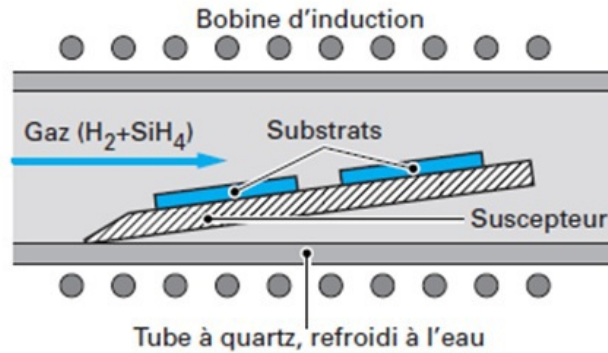


Schéma de dépôt du silicium par épitaxie.

Une variante répandue de la méthode CVD est le PECVD (plasma enhanced CVD). Le PECVD permet de produire des dépôts à des températures plus basses. Avec des gaz réactifs à pression réduite (< 260 Pa), le plasma augmente la dissociation des gaz sources pour faciliter leur réaction au niveau de la surface.

On réalise par ce moyen des dépôts de diélectriques, de semi-conducteurs, de silicium amorphe, de nitrure de titane pour le durcissement des surfaces métalliques.

3.3. La gravure

Définition

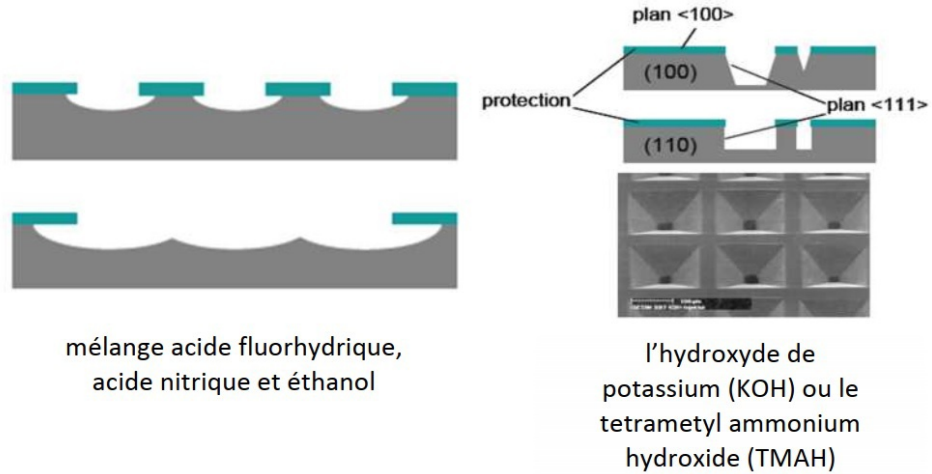
La gravure permet d'enlever de la matière (matériaux ou substrat) soit pour définir un motif, soit pour permettre aux pièces mobiles de bouger. La complexité des étapes de gravure lors de la fabrication des microsystèmes ne vient pas tant de la taille des motifs que de l'épaisseur des couches à graver. Outre les gravures classiques rencontrées en microélectronique, on réalise souvent pour les microsystèmes des gravures de substrat (silicium en général) ou des libérations.

3.3.1. Masque dur et masque souple.

Les résines de lithographie ne peuvent dans certains cas pas résister à la gravure. Il faut alors utiliser un masque dur (hard mask) comme par exemple une couche d'oxyde ou de nitrure de silicium ou une couche métallique. Ce masque dur est gravé (lithographie et gravure) et sert alors de masque pour la gravure du matériau sous-jacent. Lorsque ce dernier est gravé, le masque dur est gravé à son tour.

3.3.2. Isotropie et anisotropie

L'isotropie ou l'anisotropie de la gravure joue un rôle important sur la forme de la structure finale du dispositif finale de la gravure.

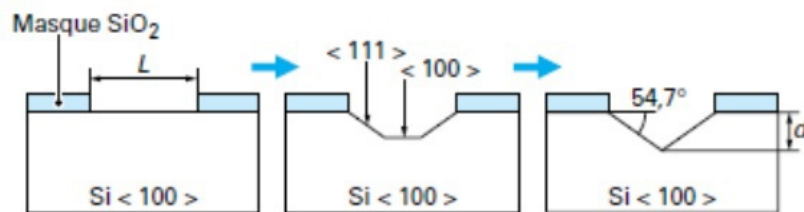


Comparaison entre gravure isotrope (à gauche) et anisotrope (à droite).

Ces deux types peuvent être obtenus soit par gravure sèche ou humide ou jouant sur les paramètres expérimentaux de ces types de gravure.

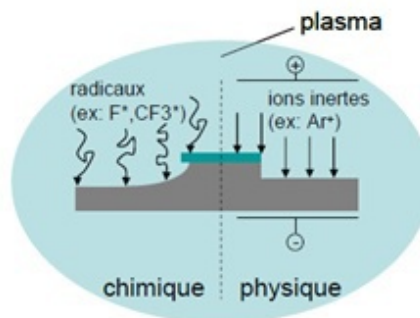
3.3.3. Gravure sèche et humide

La gravure du substrat (silicium, le plus souvent) peut être effectuée par voie humide (gravure KOH) ou par voie sèche. L'usinage par voie humide est bien connu et largement utilisé en microélectronique dans la préparation des substrats de silicium. Le mélange HNO₃ /HF est le plus utilisé. Il procède par un mécanisme cyclique d'oxydation et d'attaque de la couche formée. C'est un usinage isotropique au sens où il est peu ou pas sensible à l'orientation cristalline du silicium. Notons par ailleurs que dans le cas d'un substrat de silicium <100>, un angle de 54,7° se forme entre l'orientation <100> et <111> se forme, ce qui donne cette forme en 'V' à la gravure (voir figure suivante).



Forme typique de cavité réalisée par gravure anisotrope dans la direction <100>.

Dans les techniques de gravure sèche, le substrat est exposé à un gaz ionisé. Deux grands phénomènes de gravure sèche sont en général considérés :



Composantes d'une gravure sèche.

La composante physique est équivalente, à l'échelle atomique, à un sablage dans lequel le sable est remplacé par des espèces inertes comme l'argon, l'hélium ou le néon sous forme ionisé. En pratique, les ions inertes sont générés dans un plasma et accélérés par le champ électrique créé entre deux électrodes. Le substrat est fixé à la cathode. Cette gravure est anisotrope mais est relativement lente et ne présente pas de sélectivité. La composante chimique résulte de l'interaction entre les radicaux générés dans un plasma à partir d'un gaz réactif (SF₆, CF₄, ...) et la surface du substrat. Dans ce cas, il y a souvent concurrence entre le dépôt et la gravure. Les différents paramètres du procédé (température, pression, concentration des différents gaz, ...) vont favoriser l'un ou l'autre des phénomènes. Ce procédé de gravure chimique permet d'accéder à des cinétiques plus importantes et présente une bonne sélectivité mais est isotrope.

Le tableau suivant résume les avantages et les inconvénients de chaque type de gravure

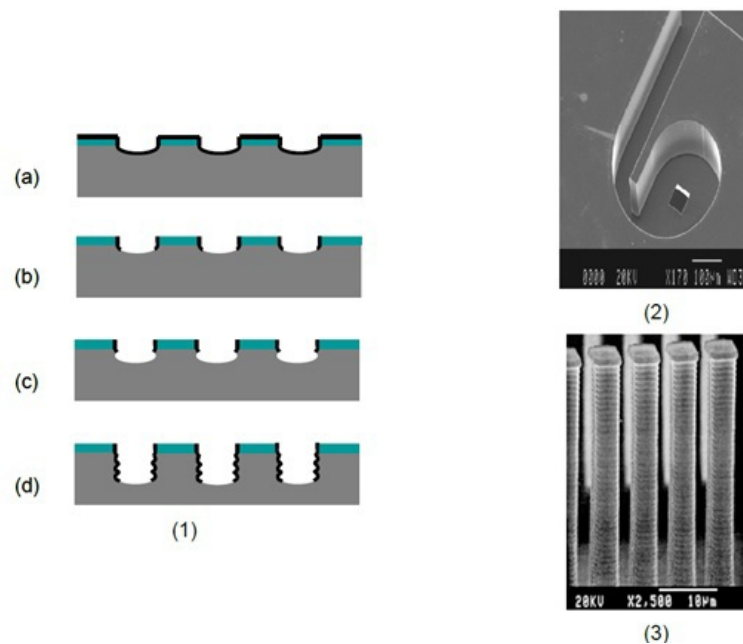
Type de gravure	Avantages	Limitations
Sèche	<ol style="list-style-type: none"> 1. Compatible avec des tailles de motifs faibles. 2. Bonne maîtrise des côtés. 3. Peu de problème d'incompatibilité avec le reste de l'empilement même si les topologies parfois importantes dans les technologies microsystemes rendent nécessaire l'utilisation de résine épaisse. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sur-gravure du matériau support de la couche à graver. 2. Coût de l'étape important. 3. Formation de polymères lors de l'étape de la gravure sèche.
Humide	Faible coût	<ol style="list-style-type: none"> 1. Sous-gravure ou gravure latérale (gravure isotrope). 2. Compatibilité avec les autres matériaux de l'empilement
Lift-off	Indépendante de la nature de la couche à graver.	Complexité technique de mise en œuvre de l'étape

Avantage et inconvénient de la gravure sèche et humide.

a) DRIE

C'est une gravure profonde du silicium, appelée DRIE [Deep Reactive Ion Etching]. Elle permet d'obtenir des motifs avec des facteurs d'aspect très importants, pouvant aller jusqu'à 30 ou 40. On peut par exemple graver des motifs en réseau de 1 µm de large sur une trentaine de micromètres de profondeur. Des équipementiers proposent des machines de gravure profonde dédiées aux microsystemes, tels que Alcatel Vacuum Technology et STS par exemple. C'est une alternative à ces deux types de gravure sèche est la gravure ionique réactive (RIE : Reactive Ion Etching) qui combine à la fois les avantages de la gravure physique et chimique en utilisant des

ions réactifs accélérés par un champ électrique. La gravure ionique réactive permet d'atteindre des cinétiques de gravures plus importantes, une bonne sélectivité ainsi qu'une anisotropie importante. La gravure ionique réactive profonde (DRIE : Deep Reactive Ion Etching, ASE : Advanced Silicon Etching ou encore Bosch process) aujourd'hui largement utilisée en usinage de volume est apparue au milieu des années quatre-vingt dix.

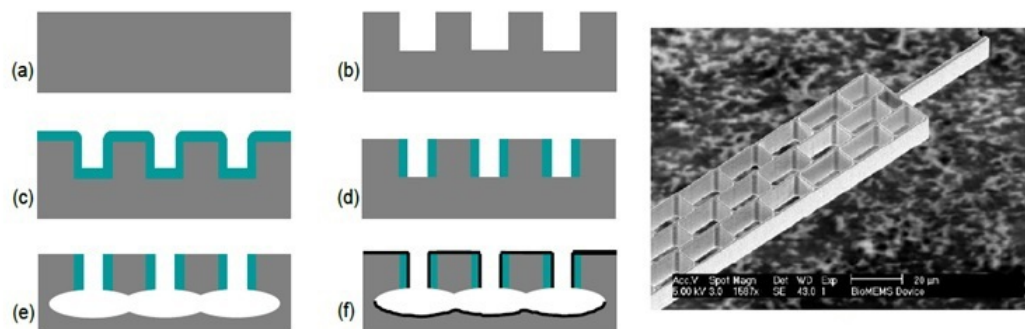


Étapes de gravure de la DRIE.

Chaque cycle du procédé commence par un dépôt uniforme d'une couche de passivation (a). Le dépôt de cette couche de type fluorocarbène est assisté par plasma à partir d'un gaz de C4F8. Dans la deuxième étape (b) du cycle, la couche de passivation est attaquée par un plasma formé à partir de SF6. Une forte polarisation du substrat rend la gravure anisotrope, c'est-à-dire que la couche de polymère est attaquée plus rapidement perpendiculairement au substrat que par les côtés. Ensuite, le fond de la tranchée, qui n'est pas protégé par la couche de passivation, subit une gravure isotrope, également dans un plasma fluoré (c). En répétant ce cycle, des tranchées peuvent être gravées dans le silicium avec d'excellents ratios de formes. Le profil montré en (d) est typique de ce procédé cyclique. Cette technique, contrairement à la gravure humide anisotrope, est indépendante de l'orientation cristalline.

b) SCREAM

D'autres procédés comme la technologie SCREAM (Single Crystal Reactive ion Etching And Metallization) inventée à l'université de Cornell en 1993 mélange séquentiellement la gravure sèche anisotrope et isotrope.

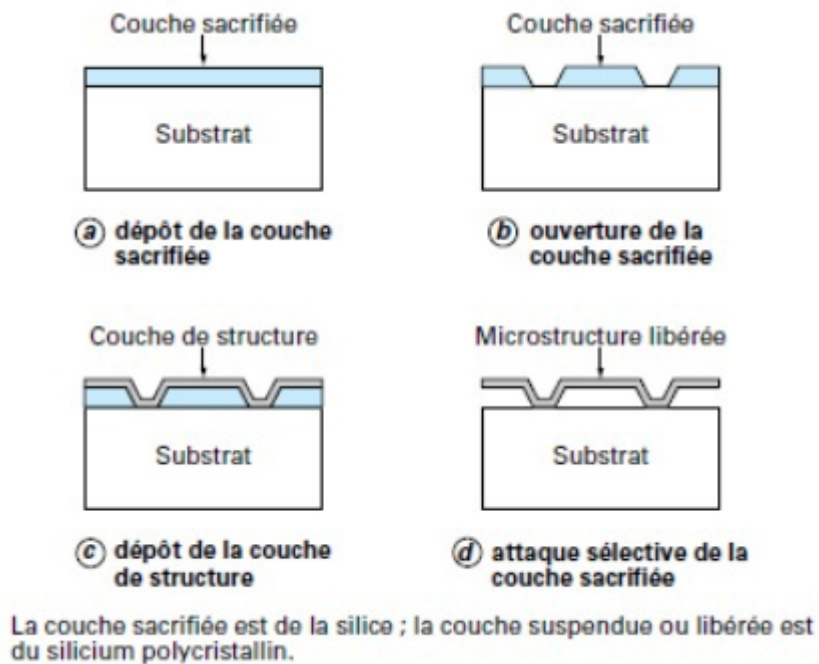


Étapes de gravure de la Scream.

Le procédé commence sur un substrat de silicium (a) dans lequel sont définies des ouvertures (b). Ensuite le silicium subit une gravure sèche anisotropique (c), puis une couche d'oxyde de silicium est déposée (d), structuré encore une fois par gravure sèche anisotropique ce qui laisse les flancs protégés (e). Enfin, le silicium subit une gravure sèche isotropique qui libère les structures (f) et le substrat est métallisé. Cette technique permet d'obtenir des structures suspendues en silicium monocristallin avec de grands rapports de forme.

3.3.4. Usinage en volume et en surface

L'usinage en volume est utilisé en microélectronique, et consiste à graver le volume non protégé par le masque. Par contre dans le cas de l'usinage en surface, la notion de couche sacrificielle entre en jeu. Le principe est de réaliser des structures suspendues par le biais d'une couche sacrificielle : l'exemple le plus utilisé est celui qui consiste à sacrifier des couches de SiO₂ pour réaliser des couches de silicium polycristallin suspendues.



Étapes de réalisation de couche suspendue par l'intermédiaire d'une couche sacrificielle.

La réalisation d'une couche suspendue comme c'est le cas pour les composant microsystèmes dépend à la fois du choix de la couche structurale, sacrificielle et les autres couches sousjacentes qui ne doivent pas être affectés lors de l'étape de la gravure de la couche sacrificielle (appelée étape de libération). Le tableau suivant donne quelques couples de couches structurales et sacrificielles avec le type de gravure.

Couche sacrificielle	Couche structurale	Gravure
Poly-Si	SiC, SiN	KOH, TMAH
Poly-Si	SiO ₂	TMAH
Polymide	Al, SiC, SiN, Ti	Plasma O ₂
SiO ₂	Poly-Si, SiC, SiN, TiN	HF
SiO ₂	Ti, Al	HF

Après la libération de la couche structurelle, la déflexion de celle-ci dépend à la fois des matériaux composants la couche structurelle et des conditions de dépôts.

3.3.5. Déflexion de la couche structurelle

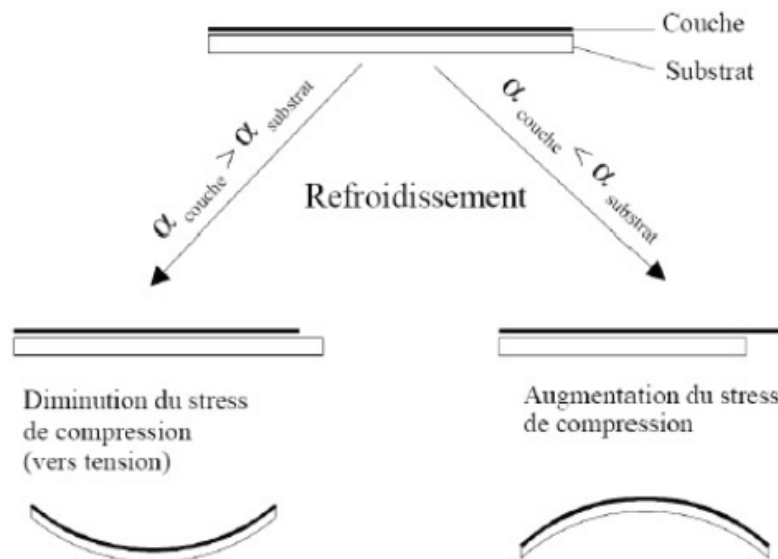
Cette partie s'attache à présenter les modèles analytiques utilisés pour la prédiction de déflexion de micro poutre. La validation de ce type de modèle permettra d'optimiser l'empilement la membrane de lentille tout en s'affranchissant des problèmes de profil non uniforme, l'intérêt d'ajouter ou non des raidisseurs, design des électrodes, module d'Young de chaque matériau, rigidité de la membrane. La validation du modèle permettra aussi de définir une modélisation par élément fin plus représentatif du dispositif final et d'avoir une bonne prédiction de l'actionnement du dispositif.

a) Contraintes résiduelles

Dans le cas des films minces, on considère deux types de contraintes résiduelles :

- Les contraintes d'origine thermique ;
- Les contraintes intrinsèques.

Le premier type de contraintes, que nous appellerons simplement « contraintes thermiques », est clairement identifié. L'origine de ces contraintes est basée dans la différence de coefficient de dilatation thermique entre les matériaux solidaires. L'élaboration des microsystèmes étant rarement effectuée à leur température d'utilisation, les contraintes thermiques s'expriment par une déformation des différents éléments lors du refroidissement de la structure. Les contraintes thermiques sont régies par la différence des coefficients de dilatation (CTE) des différents matériaux de l'empilement. Les contraintes thermiques apparaissent lors du refroidissement et induisent une augmentation des contraintes en compression ou en tension.



Représentation schématique d'une bi-couche en tension (à gauche) et une en compression (à droite)

- Si $\alpha_{\text{couche}} > \alpha_{\text{substrat}}$ alors on a une diminution du stress sur le substrat et on a tendance à un effet en tension.
- Si $\alpha_{\text{couche}} < \alpha_{\text{substrat}}$ alors on a une augmentation du stress sur le substrat et on a tendance à un effet en tension.

Les contraintes intrinsèques sont dues au procédé d'élaboration des couches et apparaissent durant la croissance. Donc les deux types sont liés vu la complexité de procédés de dépôt (différentes conditions de dépôt (température de et pression de dépôt), nature de dépôt (PECVD, PVD, ...). Vu que les contraintes résiduelles se répercutent toujours dans les profils d'un empilement de différentes couches de matériaux à cause du processus de fabrication, Stoney a donné une méthode empirique pour mesurer ces contraintes. Il a établi une relation entre la contrainte résiduelle dans le film et la courbure d'une bi-couche. Les hypothèses émises par Stoney sont :

- L'épaisseur du film est nettement plus faible que l'épaisseur du substrat ;
- La contrainte résiduelle est isotrope.

Outre ces hypothèses, il faut que la flèche maximale soit inférieure à l'épaisseur du substrat et que la longueur de l'échantillon soit au moins deux fois supérieure à sa largeur. D'autre part, les effets transversaux sont ignorés. La formule de Stoney est définie :

$$\sigma = \frac{E_s}{1-\nu_s} \frac{T_s^2}{6t} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right)$$

- σ_f : contrainte résiduelle dans le film
- E_s : module d'Young du substrat
- ν_s : coefficient de poisson du substrat
- t_s : épaisseur du substrat
- t : épaisseur du film déposé
- R_0 : rayon de courbure initial
- R : rayon de courbure après dépôt

La courbure y est exprimée à l'aide de la flèche avant ($1/R_0$) et après dépôt ($1/R$).

Dans le tableau suivant, on récapitule les différentes contraintes résiduelles (σ_f) calculer à l'aide de la méthode de Stoney :

couche	couche SiO2	X78 membrane	Ti couche d'accroche	W couche compressive	WN couche compressive	Au électrode	SiON passivation
t_i	2,00E-06	2,00E-06	1,00E-08	1,00E-07	1,00E-08	2,00E-07	1,00E-07
$h_i = \sum t_i$	2,00E-06	4,00E-06	4,01E-06	4,11E-06	4,12E-06	4,32E-06	4,42E-06
E_i	7,00 E+010	8,00E+08	1,14E+11	4,06E+11	4,00E+11	7,70E+10	7,00E+10
α_i (TCE)	5,00E-07	1,20E-04	1,05E-05	4,60E-06	4,60E-06	1,40E-05	5,00E-07
σ_{ri}	-6,00 E+07	1,50E+07	9,00E+07	-1,20E+09	-2,00E+09	5,00E+07	-7,00E+07

Récapitulatif des contraintes résiduelles des matériaux utilisés dans l'empilement utilisé dans un microsysteme optique.

Il faut noter que les contraintes résiduelles calculées ne correspondent pas forcément aux épaisseurs mentionnées ci-dessus car il est très difficile d'avoir une flèche mesurable pour des dépôts inférieurs à 500 nm. Donc dans ce tableau, les valeurs de contraintes sont extrapolés aux épaisseurs fines.

b) Courbure et déflexion d'une poutre encastree-libre due à la contrainte résiduelle.

La déflexion d'une poutre après libération est souvent représentée par le modèle de HsueH et al. Le principe de ce modèle consiste à décomposer la distribution de la déformation à travers l'épaisseur du système en une composante uniforme dans l'ensemble du système et une composante de flexion, fonction de la position par rapport à l'axe de flexion de la structure. Dans ce cas, la continuité de la déformation à l'interface est automatiquement vérifiée, et il y a uniquement trois inconnues à résoudre avec trois conditions aux limites qui doivent être satisfaites par le modèle, indépendamment du nombre de couches.

En supposant h_i la hauteur de la couche n° i :

$$h_i = \sum_{j=1}^i t_j$$

Les trois paramètres c , t_b et R (les trois inconnus du modèle à déterminer) sont définis comme suit :

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i \alpha_i t_i \Delta T - \sigma_i t_i)}{\sum_{i=1}^n (E_i t_i)}$$

$$t_b = \frac{\sum_{i=1}^n E_i t_i (2h_{i-1} + t_i)}{2 \sum_{i=1}^n (E_i t_i)}$$

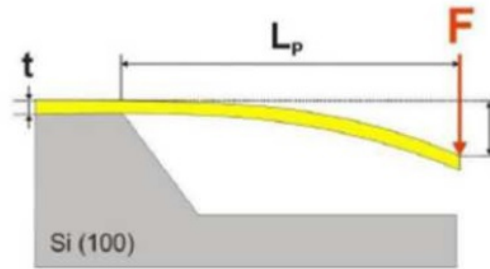
$$\frac{1}{R} = \frac{3 \left(\sum_{i=1}^n E_i t_i (2h_{i-1} + t_i) \left(\alpha_i \Delta T - \frac{\sigma_{ri}}{E_i} - c \right) \right)}{\sum_{i=1}^n E_i t_i (6h_{i-1}^2 + 6h_{i-1}t_i + t_i^2 - 3t_b(h_{i-1} + t_i))}$$

De cela on peut tirer selon la longueur de la poutre la déflexion de la poutre due aux contraintes résiduelles du multicouche après libération, en utilisant la relation suivante :

$$\delta = \frac{L^2}{2R}$$

c) Caractérisation d'une Flexion de la poutre

La méthode choisie pour mesurer les contraintes dans l'empilement de film consiste à étudier la déflexion d'un échantillon sous l'action d'une force. Les essais de gonflement (bulge) et de flexion permettent ainsi de mesurer ces contraintes. En regardant dans la bibliographie, les pressions générées sont de l'ordre de 50mbar (5000 pa) jusqu'à 150 mbar (15000 Pa) lors des tests de gonflements. Alors que les premiers tests d'actionnement nous laissent envisager des pressions de l'ordre de 100 Pa à 400 Pa pour faire fléchir la membrane ce qui est 10 fois plus petit en comparaison aux pressions appliqués lors des tests de gonflement. Pour l'instant, on se tourne vers l'autre type de caractérisations; la nanoflexion pour mesurer les contraintes résiduelle en réalisant plusieurs empilements.



Dans le cas simple d'une micro poutre isotrope et de forme rectangulaire isotrope. Une force est appliquée à l'extrémité de cette poutre de longueur L de largeur w et d'épaisseur t. sous cette sollicitation, la poutre se fléchit d'une hauteur d et en appliquant le théorème des poutres élastiques, la rigidité à la flexion est donnée par :

$$k = \frac{\delta F}{\delta y} = \frac{3 E I}{(1 - \nu^2) L^3}$$

Avec I le moment d'inertie d'une poutre ayant une section rectangulaire :

$$I = \frac{w t^3}{12}$$

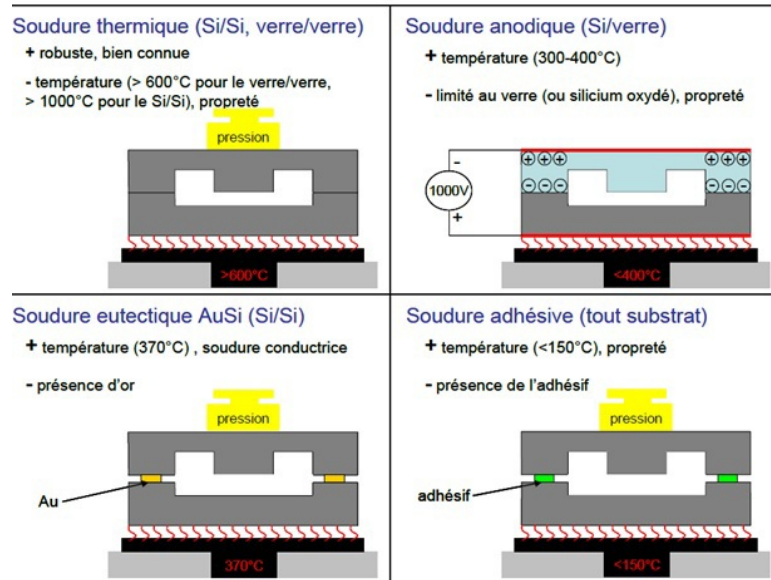
En effectuant un essai force-déformation ($F=f(y)$) sur la structure, il est donc possible de déterminer le module d'Young du matériau. Lorsque l'on applique une force sur une poutre, on induit une contrainte interne au matériau. Or, pour une poutre rectangulaire le moment de flexion n'est pas constant le long de la structure. La fréquence de résonance est définie comme suit :

$$f_n = \frac{c_n^2}{2 \pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

Avec ρ : la densité, A : aire de la section C_n : constantes qui dépendent des conditions aux limites de la micro-poutre (encastré-libre, bi encastré,...=)

3.4. Assemblage

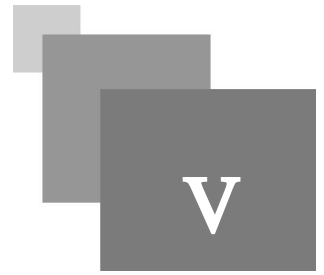
Différents types de soudure entre substrats ont été développés selon les applications. Les principales étant la fabrication de microsystèmes et le packaging.



Récapitulatif des différents types d'assemblages

Un des principaux soucis est la contrainte engendrée par la température, principalement lors d'assemblage hétérogène, c'est-à-dire de matériaux avec différentes constantes d'expansions thermiques. Le niveau de propreté requis peut être également rédhibitoire dans un procédé comme la soudure thermique. La soudure adhésive est un procédé basse température et ne nécessitant pas des procédures complexes de nettoyage mais introduit un autre matériau dans la structure, ce qui peut être indésirable en microfluidique où le contrôle des propriétés de surface est primordial. En général, l'introduction d'une étape d'assemblage de plaquette est coûteuse. On estime que l'assemblage est aujourd'hui souvent l'étape la plus coûteuse dans les procédés microsystèmes.

Exercice



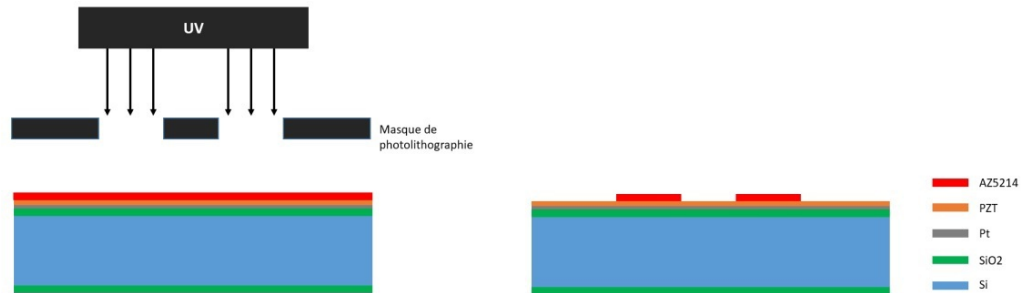
Dans le cas d'une gravure humide d'un substrat de silicium $\langle 100 \rangle$, un angle de 90° se forme entre l'orientation $\langle 100 \rangle$ et $\langle 111 \rangle$?

- Vrai
- Faux

Exercice :

VII

On souhaite réaliser la structure représenté dans la figure qui suit. Afin de structurer un matériau appelé PZT, nous utilisons une résine (AZ5214). A gauche vous avez la figure avant insolation, à droite vous avez la figure après insolation.



Exemple de structure pour un microsystème (Vue en coupe)

Question

- A partir du résultat obtenu après insolation (figure de droite), donnez le type de résine utilisée (AZ5214)
- Justifiez votre réponse

Conclusion



Lors de ce chapitre, nous avons présenté les différents outils et techniques nécessaires à la réalisation d'un microsystème. Les connaissances acquises lors de ce chapitre nous permettront d'identifier les ressources nécessaires parmi toutes celles présentées ici afin de concevoir et fabriquer un microsystème suivant un cahier de charge donné. Les techniques pour arriver au résultat final peuvent varier mais un paramètre reste très important, la réalisation doit se faire dans une salle blanche contenu des dimensions qui interviennent dans de tels dispositifs.

Bibliographie



Isabelle DUFOUR, Frédéric LOCHON, 'Microcapteurs chimiques en micropoutres silicium pour régime dynamique', DOSSIER Techniques de l'Ingénieur 'in84'.

Isabelle DUFOUR, Emmanuel SARRAUTE, 'Micromoteurs électrostatiques à capacité Variable', DOSSIER Techniques de l'Ingénieur 'd3770'. RoyaMaboudian, 'Surface processes in MEMS technology', Department of Chemical Engineering, University of California, Berkeley, CA 94720, USA.

Sorin CRISTOLOVEANU, Francis BALESTRA, 'Technologie silicium sur isolant (SOI)', DOSSIER Techniques de l'Ingénieur 'e2380'.

Carole HENAUX, Bertrand NOGAREDE, Jean-François ROUCHON, 'Actionneurs électromécaniques pour la robotique et le positionnement - Fondamentaux et structures de base', DOSSIER Techniques de l'Ingénieur 'd5341'.

Alfred PERMUY, Éric DONZIER, Fadhel REZGUI, 'Capteurs microélectroniques', DOSSIER Techniques de l'Ingénieur 'e3093'.

Anna-Maija KÄRKKÄINEN, Antti MANNINEN, Nadine PESONEN, Aarne OJAHeikki SEPPÄ, 'Applications des MEMS à la métrologie électrique', DOSSIER Techniques de l'Ingénieur 'r1002'.

Luc FEDERZONI, 'Fabrication de pièces sans usinage : le microPIM', DOSSIER Techniques de l'Ingénieur 'in55'.

Thomas SKOTNICKI, 'Transistor MOS et sa technologie de Fabrication', DOSSIER Techniques de l'Ingénieur 'e2430'.

Pierre JOSEPH, Aurélien BANCAUD, Patrick ABGRALL, 'Systèmes nanofluidiques. Technologies et applications', DOSSIER Techniques de l'Ingénieur 'nm250'.

Carole ROSSI, 'Nano matériaux énergétiques : perspectives d'intégration dans les microsystèmes', DOSSIER Techniques de l'Ingénieur 'nm5050'.

Philippe BELLEVILLE, Philippe BOY, 'Matériau PZT compatible avec le silicium Procédé de dépôt par voie sol-gel', DOSSIER Techniques de l'Ingénieur 'in40'.

Jorge-Luis REGOLINI, 'Technologie de fabrication de la microélectronique Opérations élémentaires', DOSSIER Techniques de l'Ingénieur 'e2410'.

R. Lakhmi, H. Debeda, I. Dufour, C. Lucat, et M. Maglione, « Study of Screen-Printed PZT Cantilevers Both Self-Actuated and Self-Read-Out », Int. J. Appl. Ceram. Technol., vol. 11, no 2, p. 311-320, mars 2014.

W. Sripumkhai, S. Porntheeraphat, B. Saekow, W. Bunjongpru, S. Rahong, et J. Nukeaw, « Effect of annealing temperature on platinum thin films prepared by electron beam evaporation », J. Microsc. Soc. Thail., vol. 24, no 1, p. 51–54, 2010

Emmanuel DEFAÏ, Elaboration et caractérisation de couches minces piézoélectriques de Pb(Zr,Ti)O₃ sur silicium pour applications aux microsystèmes, thèse de doctorat, INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES DE LYON, 1999

M. E. A. Brixi Nigassa, 'Conception et réalisation d'un micro-actionneur à forte amplitude de déflexion', Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2018

J. Abergel, « Matériaux piézoélectriques à forte déformation pour l'actionnement microsysteme », Université de Grenoble, 2014

M. Cueff, Micro-actionneurs piézoélectriques. PhD thesis, Université de Grenoble, 2011.

Webographie



PVD + Ebeam Renne. [En ligne]. Disponible sur: <https://microelectronique.univ-rennes1.fr/fr/chap8c.htm>.

Olivier THOMAS, Yves BRECHET, Jean PHILIBERT, Dominique MANGELINK, 'Métallurgie pour la microélectronique à support silicium', DOSSIER Techniques de l'Ingénieur 'm14'.

