

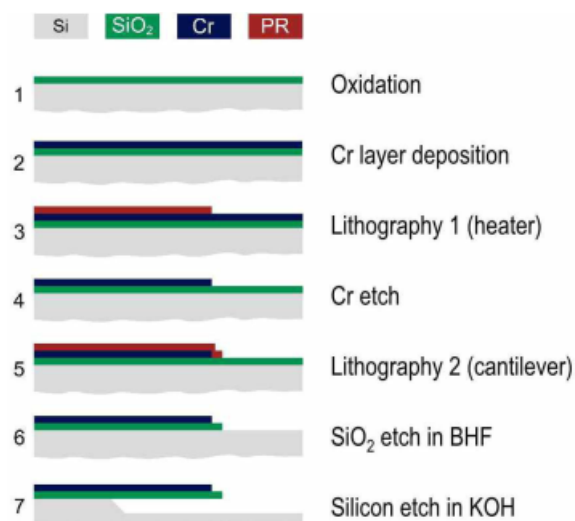
## Part I : MEMS bimorph example and clean-room introduction

### 1. A simple example of a MEMS device is the thermo-mechanical micro-actuator. Describe its principle of operation and propose a suitable fabrication process.

Un micro-actionneur thermodynamique est composé de deux couches minces : une couche de SiO<sub>2</sub> et une couche de chrome (p. ex). Comme leurs coefficients de dilatation sont différents, un changement de température induira une flexion. Si l'on applique une tension électrique à la couche de chrome, un courant va se créer et chauffer la poutre.  $\frac{1}{r} = \beta \Delta \alpha \Delta T$

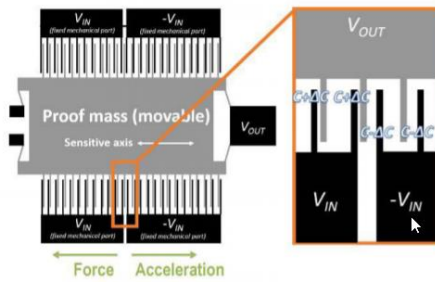
Fabrication :

- 1) Nettoyer la plaquette de silicium et oxyder la couche supérieure à haute température (>1000°C) dans un four rempli d'air riche en oxygène.
- 2) Dépôt d'une couche de chrome par PVD (choix du chrome pour son coefficient de dilatation très différente de celui du dioxyde de silicium)
- 3) Utilisation de la photolithographie pour modéliser la couche de chrome : recouvrement de la plaquette avec de la photorésine, développement de la photorésine (UV) pour ne laisser que le motif voulu
- 4) Gravure humide du chrome dans une solution de chromate puis décapage de la photorésine restante
- 5) Photolithographie du SiO<sub>2</sub>
- 6) Gravure humide du SiO<sub>2</sub> par BHF et décapage de la photorésine restante
- 7) Gravure anisotrope du silicium dans du KOH pour libérer la poutre



### 2. Describe some commercially successful microsystems (MEMS) and discuss what technology stands behind to manufacture them in high volume and high yield.

- Accéléromètres :  
Une masse mobile avec des dents comme un peigne sur les côtés et en face, d'autres dents mises sous tensions. L'enchevêtrement de dents forme un réseau de capacités. Une accélération de l'objet à droite produit une force vers la gauche sur la masse. La variation de distance entre les dents induit une variation de la valeur des capacités et donc de la tension de sortie lue aux bornes de la masse. L'intervalle entre les peignes doit être minimisé le plus possible. Ils ont besoin d'une encapsulation hermétique.



- Enhanced capacitive readout area by using combs
- Differential readout:  
 $V_{OUT} \approx \Delta C / C$
- Key parameter for sensor sensitivity and resolution: combs gap ( $g$ )

Micro and Nanofabrication (MEMS)

On les utilise dans les smartphones pour les jeux ou la rotation de l'écran, mais aussi dans les voitures pour détecter un accident et sortir les airbags à temps

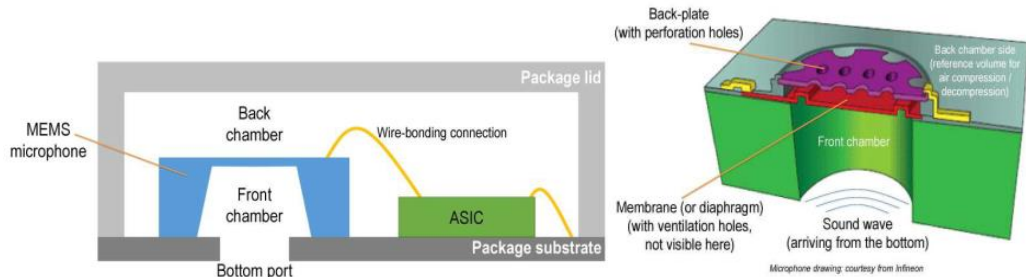
#### • Microphones :

Un microphone est composé d'une membrane et d'une plaque fixe. Les ondes sonores génèrent une différence de pression qui déforme la membrane, ce qui conduit à une différence de pression, de capacité. Incoming sound wave → pressure differential → membrane déformation →  $\Delta C$

Les deux membranes sont trouées : Ventilation holes: laissent sortir l'air comprimé de la chambre arrière et perforation holes: transmettent le son à la chambre arrière.

Ils sont dans un paquet qui protège l'appareil (protection électromagnétique cruciale), plus la chambre acoustique est grande plus le SNR (Signal to Noise Ratio) est élevé

Bande passante : 20Hz – 20kHz

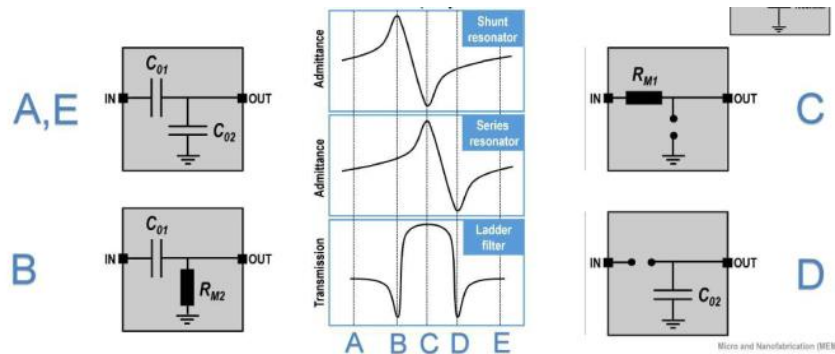


Microphone drawing: courtesy from Infineon

Ils sont utilisés dans les smartphones pour capter la voix, réduire les bruits environnant ou dans les kits mains libres.

#### • Résonateurs BAW:

Ils sont constitués d'une couche de piézoélectrique entre deux électrodes métalliques. L'épaisseur de la couche de piézoélectrique va osciller. On utilise sa fréquence de résonance pour en faire des filtres passe-bande.



Micro and Nanofabrication (MEMS)



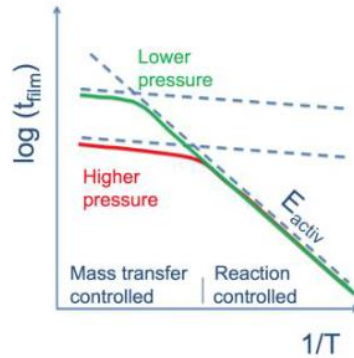
Ils sont utilisés dans les smartphones pour filtrer les ondes wifi, la 3G ou la connexion LTE.

### 3. Discuss different contamination problems in a clean room that can occur during a microfabrication process and different clean room strategies to avoid contamination of the air with particles.

- Particules dans l'air : si leur taille est égale à la taille des éléments fabriqués, le risque de ne pas pouvoir faire fonctionner le MEMS est important.
- Ions métalliques : Ils sont pratiquement présents dans tous les produits chimiques utilisés dans la micro fabrication. Les propriétés électriques des semi-conducteurs dépendent des impuretés. Si un ion métallique non voulu se déplace dans une zone sensible, cela peut amener à un échec du dispositif bien après la fabrication.
- Des traces de produits chimiques ou de l'eau pas assez pure peut mener à des dépôts, de la gravure, des alliages, qui amènent une non-uniformité dans le processus de fabrication
- Un homme produit entre 100'000 et 1'000'000 particules par min, il est donc important d'être 100% couvert d'une combinaison spéciale anti-poussière lorsque l'on rentre dans une salle blanche.
- Pour travailler dans un air le plus pure possible, des stations de travail individuelles avec un flux d'air pur hautement filtré peuvent être utilisées : l'air sort depuis le haut de la hotte et ressort devant. Si des produits toxiques sont utilisés, des stations existent avec une ventilation à l'arrière qui évacue la partie contaminée.
- On peut aussi purifier la totalité de l'air de la salle blanche. L'air est constamment évacué de la salle par le sol, filtré, puis réinjecté dans la chambre. Les quelques impuretés produites sont donc immédiatement évacuées. La température et l'humidité de la salle sont aussi strictement contrôlées. Mais ce système coûte très cher.

## Part II : Chemical vapor deposition (CVD)

4. Discuss the mass transfer-controlled and reaction-controlled regimes in a CVD process. How do temperature and pressure have an influence ?



Le taux de croissance du film en fonction de  $1/T$  est une droite dont la pente correspond à l'énergie d'activation. C'est le régime de contrôle de la réaction. Si on augmente la température, le taux de croissance augmente, si on l'augmente trop, le flux de gaz ne peut plus fournir une concentration suffisante en molécule pour tenir un taux aussi élevé. On entre en régime de contrôle du transfert de masse. Dans ce régime, si on baisse la pression, la déposition restera plus longtemps quand on augmente la température. A basse pression, la densité moléculaire est plus faible, le libre parcours moyen dans le gaz est plus long.

$$t = CPe^{-E/kT}$$

5. Discuss the different types of CVD processes that are used in microfabrication.

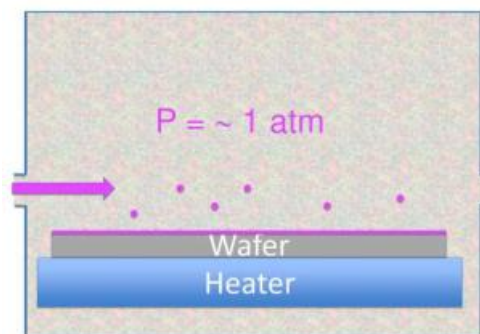
- **APCVD** (Atmospheric pressure)

Haute pression = taux de croissance très rapide = consommation de gaz élevée. On utilise de l'hydrogène ou du nitrogène

$T = 350-1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  = régime contrôle de transfert de masse  $\rightarrow$  contrôle de la concentration et du flux de gaz très important

La réaction peut déjà commencer dans le gaz  $\rightarrow$  présence de précipités dans la couche mince  $\rightarrow$  non uniformité de la couche

Wafer placé horizontalement



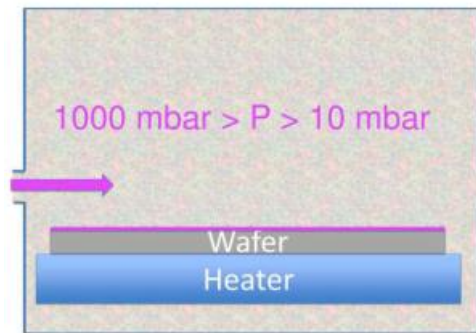
- **SACVD** (Sub-atmospheric pressure)

$P = 1000 - 10\text{ mbar}$

Basse pression = moins d'interactions entre les molécules = moins de réactions non désirées dans le gaz

Densité moléculaire plus faible et libre parcours moyen plus grand  $\rightarrow$  réduction des variations locales de la densité de gaz  $\rightarrow$  film plus uniforme

Consommation de gaz réduite



- **LPCVD** (Low pressure)

$P = 1 - 0.1 \text{ mbar}$

Libre parcours moyen plus petit = évite gradient de concentration perpendiculaire au flux = meilleure uniformité

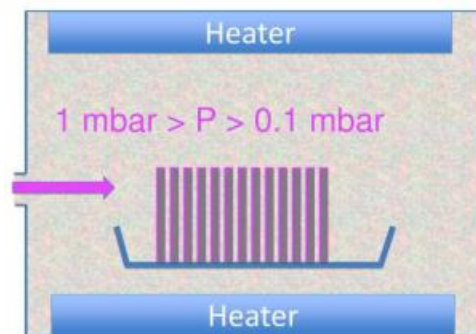
$T = 400 - 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$  = régime de contrôle → bon contrôle de  $T$  pour éviter changements trop rapides du taux de croissance (10 à 100 fois plus petit qu'en APCVD)

Les wafers peuvent être mis verticalement (gaz homogène), on peut en mettre plus

Gradient de température ( $T$  plus basse à l'entrée) pour aider la réaction

Temps 1 pour que les molécules arrivent à la surface : plus petit au début

Temps 2 pour réagir sur la surface : il doit être plus rapide à la fin pour compenser  $T_1$  et avoir la même chose sur tous les wafers

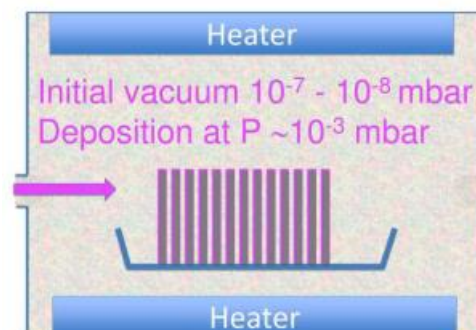


- **UHV/CVD** (ultrahigh vacuum)

$P = 10^{-7} - 10^{-8} \text{ mbar}$ , croissance du film à  $P = 10^{-3} \text{ mbar}$

Libre parcours moyen de l'ordre de la taille du réacteur → presque plus d'interaction entre les molécules de gaz

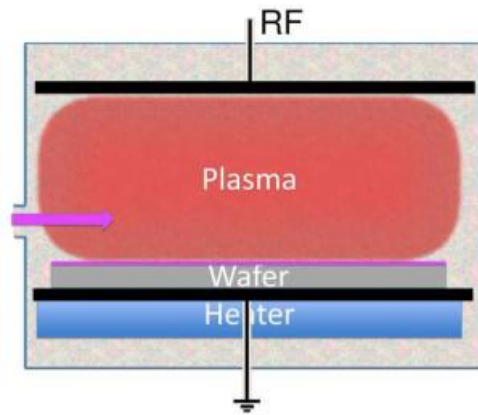
$T = 500 - 600^{\circ}\text{C}$ , mais on utilise basse  $T$  pour les semi-conducteurs (haute  $T$  permet une trop grande diffusion des dopants)



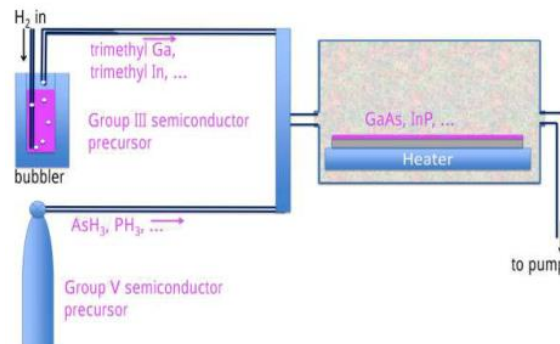
- **PECVD** (plasma enhanced)

Configuration du LPCVD + tension RF de 400kHz ou 13.56MHz pour créer plasma

Molécules gagnent en énergie → barrière d'énergie réduite → température nécessaire plus petite  
→ plus de choix de substrat



- **MOCVD** (metal organic)  
Configuration du SACVD, on veut déposer un certain métal normalement pas gazeux, on utilise un gaz porteur (ex. hydrogène) injecté sous forme de bulles dans le métal liquide  
 $T = 300 - 500\text{ }^{\circ}\text{C} \rightarrow$  contrôle important de la pression de vapeur de la source de métal et sécurité (toxicité)



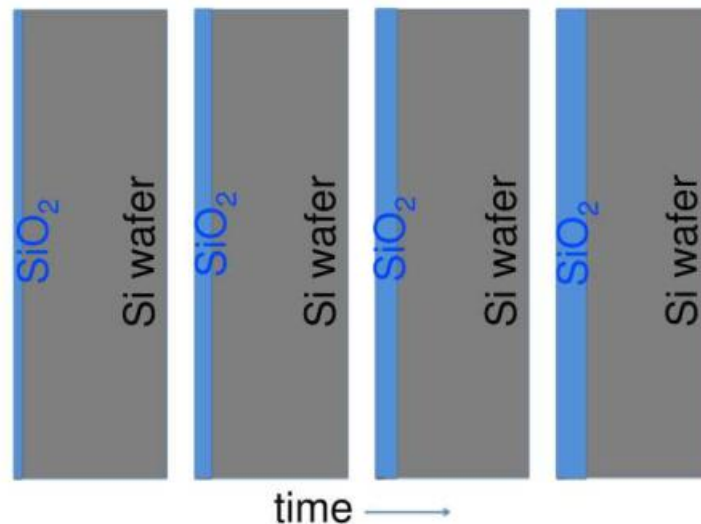
- **ALCVD** (Atomic layer CVD)  
Cf. question 9

## 6. Discuss the thermal oxidation and local oxidation (LOCOS) process of silicon.

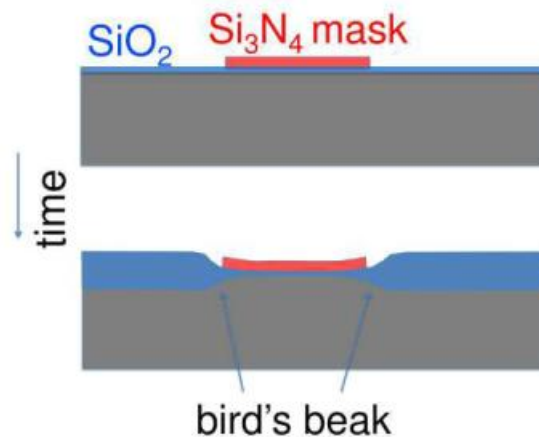
Oxydation humide : substrat exposé à de la vapeur d'eau à haute  $T \rightarrow$  formation d'oxyde + dégagement hydrogène

Oxydation sèche : substrat directement exposé à l'oxygène

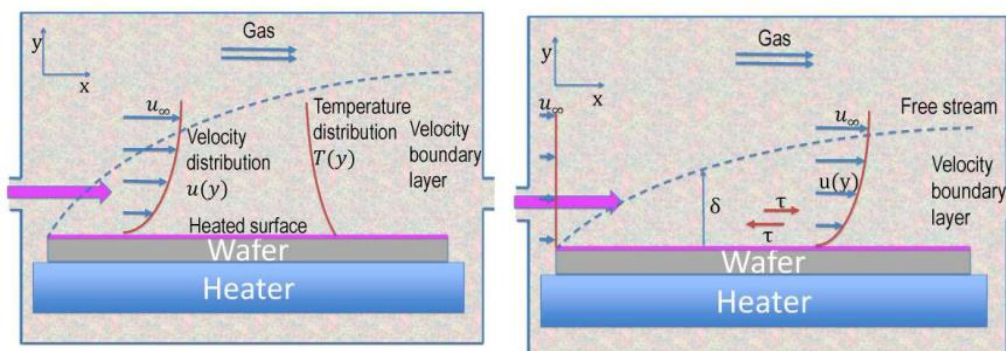
L'oxyde se forme par diffusion des atomes d'oxygène. La plaquette de silicium est facilement accessible au début donc la réaction est rapide ( $\sim t$ ) puis comme la couche d'oxyde est plus grande, la diffusion prend plus de temps et donc la formation d'oxyde est plus lente ( $\sim \sqrt{t}$ )



L'oxydation locale est permise grâce à un masque en nitrure de silicium qui ne laisse pas les atomes d'oxygène diffuser. L'oxydation est omnidirectionnelle → un peu de diffusion peut se produire sur les bords du masque = bec d'oiseau



7. Discuss the development of a thermal and concentration boundary layer near a heated substrate. How are these involved in or influence the Reynolds number of the system ?



Le substrat est chauffé. Le gaz aura une température beaucoup plus élevée juste au-dessus de la plaquette que plus loin → formation d'un gradient de température

Plus on avance dans la direction de déplacement du gaz, plus la courbe de  $T$  augmente → le gaz est de plus en plus influencé par les couches inférieures qui ont déjà été chauffées

La concentration du gaz varie également avec la hauteur → plus on est proche du substrat plus les atomes auront déjà diffusé → la concentration est plus faible à la hauteur du substrat



Le nombre de Reynolds est le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses :  $Re = \frac{\rho u_{\infty} x}{\mu}$

Avec  $\mu$  la viscosité dynamique du fluide,  $u_{\infty}$  la vitesse du fluide à l'infini

Re ne dépend pas de la coordonnée  $y$ , quand  $Re = 5 \times 10^5$ , le régime d'écoulement passe de laminaire à turbulent

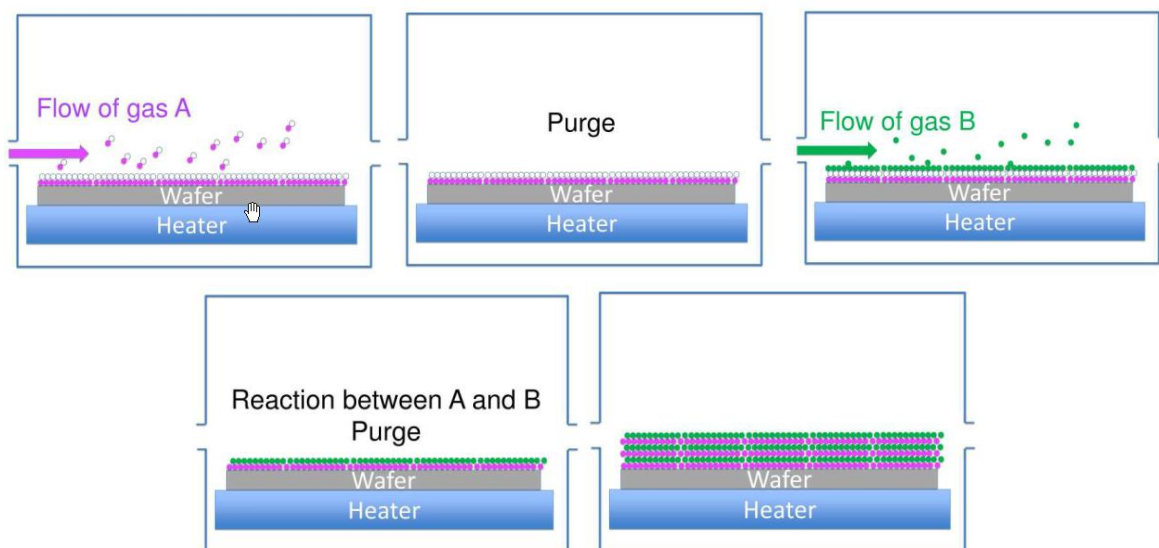
## 8. Comparing reaction- and diffusion-limited growth rates in a CVD process, how can one write and understand the dependence of CVD growth rate as a function of temperature?

Le taux de croissance de la couche mince est proportionnel  $\dot{N} = \frac{k_{surf} h}{k_{surf} + h} \rho_{\infty}$ , avec  $k_{surf}$  le taux de réaction à la surface,  $h$  le coefficient de transfert de masse

Si le taux de réaction à la surface est plus grand que le coefficient de transfert de masse, on est en régime de contrôle du transfert de masse  $\dot{N} = h \rho_{\infty}$  (proportionnel à  $T^{3/2}$ )

Si le coefficient de transfert de masse est plus grand que le taux de réaction à la surface, on est en régime de contrôle de la réaction  $\dot{N} = k_{surf} \rho_{\infty}$  qui dépend exponentiellement de la température

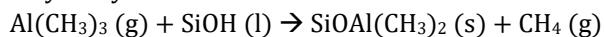
## 9. Discuss the technique of Atomic Layer Deposition (ALD). How can one deposit a layer of $Al_2O_3$ with this process?



On dépose successivement des couches de deux matériaux. Les réactions sont auto-limitante = une fois qu'une molécule est placée sur chaque spot réactif, la réaction s'arrête d'elle-même. Les deux gaz réagissent ensemble grâce à la haute température de travail

Pour déposer une couche d' $Al_2O_3$ , on pose une couche de  $Al(CH_3)_3$  puis une couche de vapeur d'eau qui réagit avec la première couche, puis une nouvelle couche de  $Al(CH_3)_3$  etc.

La première couche de triméthyl aluminium est adsorbée par chimisorption grâce aux molécules d'hydroxyde OH de la surface de silicium. La réaction dégage du méthane



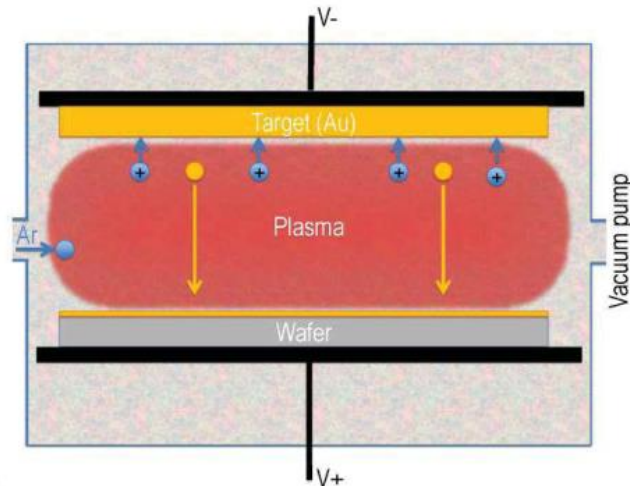
La chambre est purgée complètement avec un gaz inerte (Nitrogène) et de la vapeur d'eau est injectée. Elle réagit avec le TMA pour donner de l'oxyde d'aluminium et un nouveau dégagement de méthane. On purge la chambre encore une fois → une couche monoatomique d'oxyde d'aluminium avec des terminaisons OH, ce qui permet de répéter le processus à l'infini jusqu'à atteindre l'épaisseur voulue



### Part III : Physical vapor deposition (PVD)

11. List the various techniques that are called « Physical Vapor Deposition (PVD) », describe briefly their principle of operation, and list their advantages and disadvantages.

- **Pulvérisation (sputtering)**



Faire le vide et mettre de l'argon (10-100mTorr) → crée un plasma avec une tension de 1500 V

Les ions positifs sont accélérés vers la cathode (-) où se trouve le matériau à déposer (target) → impact énergétique → atomes target éjectés → traverse le plasma

L'espace est rempli de plasma (électrons) qui entre en collision avec le substrat → ça chauffe → il faut refroidir

On peut déposer que des matériaux conducteurs

- **Evaporation thermique**

Matériau à déposer dans un creuset pour chauffer, plaquette au-dessus pour déposer la vapeur

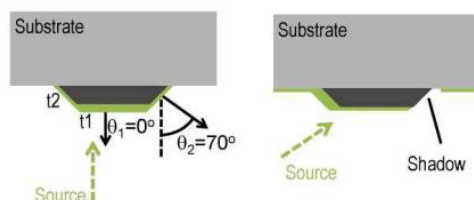
On chauffe soit avec un courant autour ou dans le creuset mais il y a un risque de contamination ou d'alliage

Sinon on utilise un canon à électrons, plus complexe mais peut contrôler la trajectoire avec champ magnétique

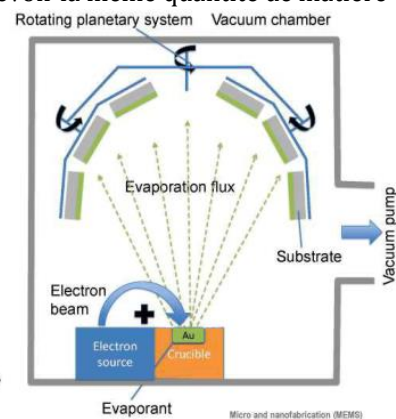
On chauffe assez pour faire de la vapeur mais on peut changer la température pour augmenter le taux d'évaporation. Absence de dommage sur le film, pureté de la couche, métaux conducteurs et isolant peuvent être déposés

« Shadow effect » et non uniformité sur de larges distances → système de planètes tournantes pour recouvrir plusieurs plaquettes en même temps et recevoir la même quantité de matière

- Uniformity issues by topographical surfaces and by shadowing

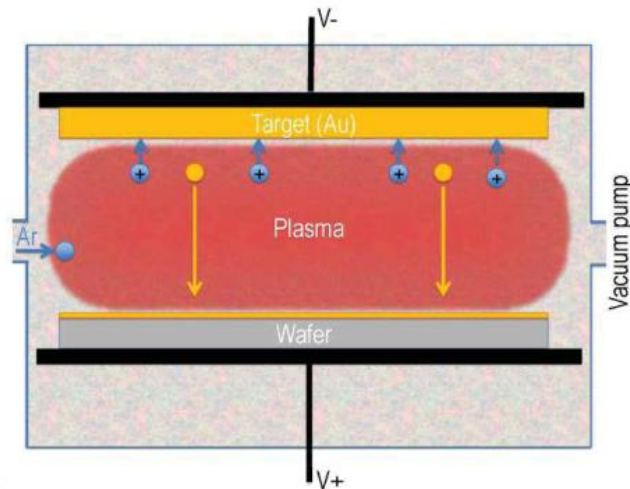


$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{\cos(\theta_1)}{\cos(\theta_2)} \approx 3, \text{ when } \phi = 0^\circ, \theta_1 = 0^\circ, \theta_2 = 70^\circ$$



- (Déposition par pulsations laser)
- (Épitaxie et épitaxie par canon à molécules)

12. Describe the physical vapor deposition (PVD) called “sputtering”, its working principle, basic configurations, typical materials used, as well as advantages and limits.



Faire le vide et mettre de l'argon (10-100mTorr) → crée un plasma avec une tension de 1500 V

Les ions positifs sont accélérés vers la cathode (-) où se trouve le matériau à déposer (target) → impact énergétique → atomes target éjectés → traverse le plasma

Pulvérisation DC : tout l'espace entre les électrodes est rempli de plasma et donc d'électrons. Ils vont être repoussés par la cathode et vont entrer en collision avec le substrat qui va donc chauffer. Un système de refroidissement est nécessaire. Seuls les matériaux conducteurs peuvent être utilisés comme matériaux de déposition

Si on applique une tension AC, les ions positifs et électrons s'écraseront alternativement sur la cible, ce qui empêchera la charge de se charger. Si la fréquence est trop faible, les ions auront suffisamment de temps pour quand même charger la cible et arrêter le plasma ( $f > 50\text{Hz}$ ). Avec une fréquence moyenne, les électrons n'auront pas suffisamment d'énergie pour éjecter les ions positifs ( $f > 50\text{kHz}$ ). L'oscillation des électrons permet un meilleur rendement : un taux de déposition plus élevé ainsi qu'une consommation d'énergie plus basse.

Les matériaux isolants conduisent mal la chaleur, il faut donc un bon système de refroidissement

13. Describe the physical vapor deposition (PVD) called “thermal evaporation”, its working principle, basic configurations, typical materials used, as well as advantages and limits

On place le matériau à déposer dans un creuset pour le chauffer, la plaquette au-dessus pour déposer la vapeur

Soit on fait passer un courant autour ou dans le creuset (risque de contamination et alliage), soit on utilise un canon à électrons (plus complexe mais on peut contrôler la trajectoire des électrons avec un champ magnétique)

Il faut chauffer suffisamment pour que le matériau passe en phase vapeur, mais chauffer plus ne va pas faire augmenter le taux d'évaporation, pour le changer il faut baisser la pression du réacteur. Le taux minimum est atteint à  $P = 0$

Les avantages sont l'absence de dommage sur le film et la pureté de la couche, les métaux conducteurs et isolants peuvent être déposés.

Les désavantages sont le « Shadow effect » et la non-uniformité sur de larges distances

Un système de planètes tournantes permet de recouvrir plusieurs plaquettes en même temps mais aussi qu'elles reçoivent la même quantité de matière

(Cf question 11)

14. Describe the uniformity of thin film on a flat substrate by thermal evaporation by analyzing the mass flow.

15. When growing thin films by PVD (and CVD) there is always possible occurrence of mechanical stress. Please discuss this issue by providing some examples of film growth mechanisms and solutions to remedy.

Extrinsic stresses → différence de coefficient d'expansion thermique

Stress uniforme, la plupart des matériaux ont un CTE > que le silicium (sauf SiO<sub>2</sub>, SiN, diamant)

Intrinsic stresses → méthode de déposition, structure

Lattice (distance entre deux atomes), atomes étrangers, gradient de stress sur l'épaisseur du film, le bombardement pendant la déposition enlève les atomes moins bien attachés → réduit le stress

Tensile stress → concave, crack

Compressive → convexe, buckling

$$\sigma_f = \frac{E_s}{6 \times (1 - \nu_s)} \frac{t_s^2}{t_f} \left( \frac{1}{r_{sf}} - \frac{1}{r_s} \right)$$

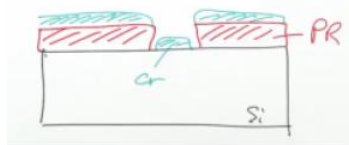
On peut enlever une partie des stress intrinsèques avec un recuit

On peut aussi compenser les tensile stress avec les compressive stress

Déposer successivement des couches avec tensile et compressive stress → diminue stress total

16. Describe the lift-off process to deposit for example a thin layer of Ti.

En évaporation thermique, la pression de la chambre est très basse, ce qui rend le libre parcours moyen des atomes dans l'ordre de grandeur du réacteur → les atomes ne vont pas croiser d'autres atomes sur leur chemin et iront tout droit jusqu'au substrat tous dans la même direction → si un obstacle se trouve sur le chemin, un effet d'ombre apparaît → on utilise cet effet pour le processus de lift-off : on met un masque de photorésine sur le substrat avec les parois penchées vers l'intérieur → laisse un espace entre la résine et la couche déposée → on vient dissoudre la photorésine avec du dissolvant sans avoir besoin d'utiliser de gravure



17. In which situation do you use sputtering instead of evaporation to form thin films on surfaces?

Evaporation :

- Risque de contamination ou d'alliage avec la méthode du creuset
- « Shadow effect » à cause du flux directionnel, mais peut s'enlever avec la méthode des planètes tournantes
- On ne peut pas déposer les alliages (température d'évaporation différente)

18. Describe the relation between vapor pressure and temperature in the case of thin film deposition in a vacuum chamber.

- Hertz-Knudsen equation

$$\Phi_e = \frac{1}{A_e} \cdot \frac{dN}{dt} = \frac{\alpha \cdot N_A \cdot (P_v - P)}{\sqrt{2\pi \cdot M \cdot R \cdot T}}$$

$$\Gamma_e = \Phi_e \cdot \frac{M}{N_A}$$

$\Phi_e$  = vapor flux in [molecules/(m<sup>2</sup>·s)]

$A_e$  = source surface area in [m<sup>2</sup>]

$N$  = number of gas molecules

$\alpha$  = sticking coefficient (0 <  $\alpha$  < 1 = ideal case)

$N_A$  = Avogadro constant in [mol<sup>-1</sup>]

$P_v$  = vapor pressure of the evaporant in [Pa]

$P$  = reactor pressure in [Pa]

$M$  = molar mass in [kg/mol]

$R$  = gas constant in [J/(mol·K)]

$T$  = temperature in [K]

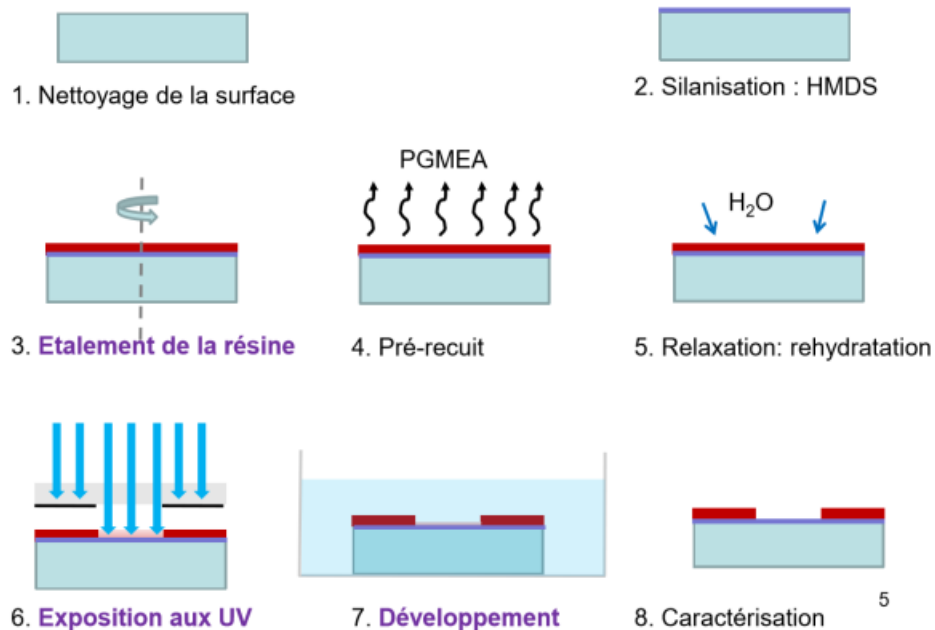
$\Gamma_e$  = evaporation mass flux in [kg/(m<sup>2</sup>·s)]

$P_v$  augmente avec  $T$

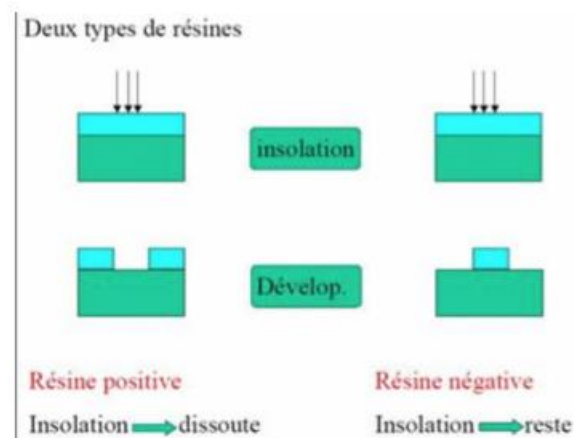
## Part IV: Lithography

19. Describe the principle of photolithography using UV exposure tools, exposure methods, masks, as well as photoresist contrast mechanism.

- 1) Préparation du substrat  
On nettoie le substrat et on le rend hydrophobe
- 2) Resist coating  
On met de la photorésine en contrôlant l'épaisseur, la couche doit être très uniforme  
La surface doit être propre et sans contamination de particules sinon l'adhésion de la résine est moins bonne
- 3) Pré-baking  
Le prérecuit sert à enlever le surplus de solvant et à sécher la résine
- 4) Réhydratation
- 5) Resist exposure  
On expose la résine aux UVs en mettant un masque par-dessus pour exposer uniquement les zones souhaitées  
On peut faire un test avant la vraie étape pour trouver le temps idéal d'exposition
- 6) Resist development  
Dissoudre la résine qui n'a pas été polymérisée ou les liaisons qui ont été fragilisées par l'exposition
- 7) Pattern transfer (etching. Lift-off)  
On fait la gravure pour faire apparaître le motif sur le wafer
- 8) Resist stripping  
Enlever la résine restante



Il y a deux sortes de résine : les positives et les négatives



Contact exposure :

- Le masque est en contact avec le substrat
- Meilleure résolution (limitée par la diffraction)
- Risque de contamination

Proximity exposure :

- Le masque est à quelques micromètres du substrat
- Moins bonne résolution
- Aucun risque de contamination

## 20. Describe the use of a direct laser writing system to make a photo-mask.

Pour réaliser des motifs par lithographie, on utilise des photomasques qui bloquent ou laissent passer la lumière vers le substrat. Ces masques sont la plupart du temps réalisés par une écriture direct par laser d'un wafer. Pour cela on utilise une plaque de quartz recouverte d'une couche de chrome et de photorésine. Le laser écrit de manière sérielle sur la photorésine le motif voulu. Le chrome est ensuite attaqué chimiquement là où la résine a été enlevée. Le wafer est ensuite lavé pour le débarrasser de la résine. Le produit final est donc un photomasque en chrome bloquant la lumière sélectivement permettant ainsi de graver le motif beaucoup plus rapidement

## 21. Describe the principle of electron beam lithography (EBL) by giving some examples and listing some advantages and disadvantages.

On utilise des électrons accélérés à très haute vitesse pour graver des motifs dans un substrat  
Génère des électrons libres dans une chambre sous vide poussé  $10^{-10}$  mbar → on peut les générer par émission thermique ou par un fort potentiel électrique  
Accélère les électrons dans une deuxième chambre soumise à un vide moins poussé  $10^{-8}$   
Les électrons sont focalisés par un champ magnétique afin d'obtenir la meilleure résolution possible  
Dans la dernière chambre se trouve le substrat, à une pression d'environ  $5 \times 10^{-7}$  mbar  
L'utilisation d'électrons permet d'avoir une bien meilleure résolution qu'un laser mais ne permet que de travailler en mode sérielle ce qui limite sa vitesse de travail  
L'équipement coûte très cher

## 22. Describe the principle of scanning probe lithography by giving some examples and listing some advantages and disadvantages

Le SPL utilise une fine pointe qu'on approche de la matière pour mesurer et graver  
Le bout de la pointe interagit avec la matière et déforme le cantilever sur lequel elle est accrochée → C'est cette déformation qui donne la topologie de l'échantillon  
Pour le mode « écriture » (gravure), la pointe est chauffée et mise en contact avec un polymère spécial se vaporisant au contact de la pointe



L'avantage de cette technique est qu'on peut lire et écrire avec la même pointe, mais on peut l'utiliser qu'en mode sériel

23. Lithography often aims for highest resolution of the patterning. Discuss the resolution limits for various lithography techniques including UV, DUV, electron beam, and scanning probes lithography.

UV, DUV, EBL : diminuer la longueur d'onde = augmenter résolution

La résolution  $\approx \lambda/2 \rightarrow$  lumière UV moins énergétique que DUV  $\rightarrow$  résolution plus faible (50nm à 800 nm)

EBL utilise des électrons avec longueurs d'onde jusqu'à quelques dixièmes d'Angstrom  $\rightarrow$  encore meilleure résolution (10nm), mais à ce niveau c'est les imperfections du système qui font des aberrations qui élargissent le diamètre effectif du faisceau qui sont le facteur limitant

SPL: plus limité par la taille de la longueur d'onde mais pas les dimensions de la pointe scannant la surface (~5nm de diamètre)

## Part V: Dry etching

24. What are simple rules for designing dry etching processes for silicon, metals and polymeric materials? How can one favour anisotropy in a fluorocarbon plasma for the etching of Si?

On utilise des gaz à partir de fluor et de carbone

Pour du Si, on peut utiliser divers gaz ayant un ratio F/C différents

Pour le SiO<sub>2</sub> il est recommandé d'utiliser en plus un bombardement de ions pour casser les liaisons Si-O

Pour le Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> on utilise plutôt des gaz fluoré (SF<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>F<sub>6</sub>) en combinaison avec un bombardement de ions

Pour les polymères on utilise de l'O<sub>2</sub> sous forme de plasma ainsi qu'un bombardement de ions, avec des masques à base de Si ou métal

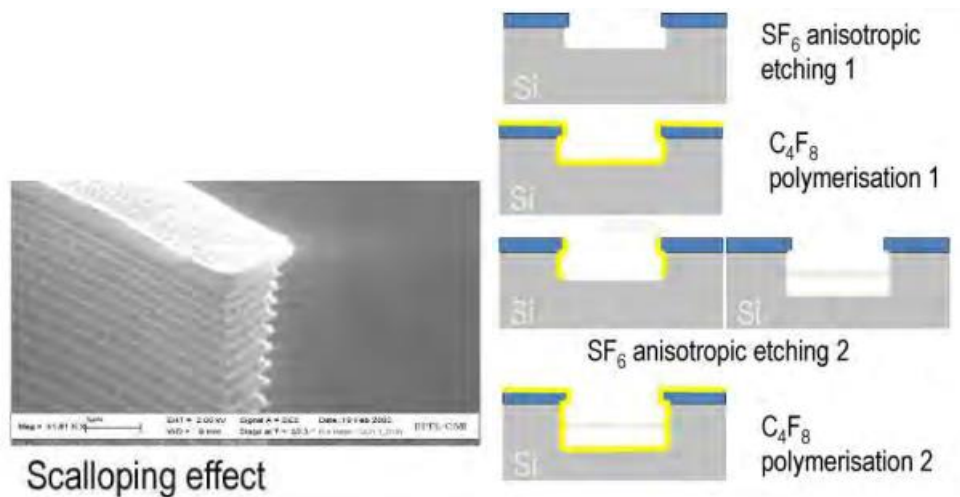
Pour l'Al, Ti, Pt, on utilise des gaz à base de Cl et pour le Ta, W, Mo on utilise du fluor, le tout en combinaisons avec des masques en photorésine

Dans un plasma fluorocarboné, l'anisotropie peut être favorisée en utilisant une mixture de gaz hautement fluoré attaquant le Si et de gaz plus carboné se polymérisant sur les murs de Si

On peut aussi jouer sur le ratio F/C et la tension appliquée au plasma pour que le gaz attaque le silicium verticalement et se polymérise horizontalement

25. Discuss the mechanism and features of the so-called Bosch dry etching process.

Le procédé Bosch consiste en l'utilisation de deux gaz utilisés en alternance, l'un creusant le Si (SF<sub>6</sub>, haute concentration en fluor) et l'autre se polymérisant sur le Si afin de le protéger (C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>, haute concentration en carbone), ceci en combinaison avec un champ électrique appliqué verticalement  $\rightarrow$  creuser le Si verticalement sur de grandes profondeurs tout en évitant d'attaquer horizontalement le Si  $\rightarrow$  anisotropique et facilement reconnaissable par les marques que laissent les différentes étapes successives (scalping effect), on peut réduire ces marques en diminuant le temps de chaque cycle SF<sub>6</sub>/C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>



26. Explain what an ion sheath in a dry etching plasma is. What is the role of the working electrode size on etching.

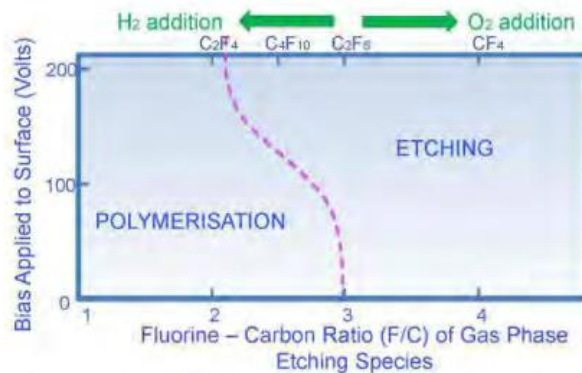
C'est une zone du plasma pauvre en électrons près du substrat

On place la source RF du côté du substrat et on ajoute une capacité entre la source et le substrat → capa va se remplir → elle crée un fort potentiel négatif afin d'accélérer les ions positifs du plasma plutôt en direction du substrat que de l'autre électrode

Maximiser le potentiel électrique au substrat → électrode plus petite du côté du substrat

$$\frac{V_t}{V_p} = \left( \frac{A_p}{A_t} \right)^4$$

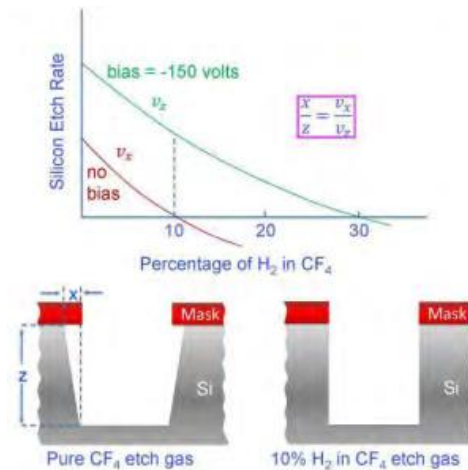
27. Discuss what is the role of adding hydrogen gas to  $\text{CF}_4$  for the dry etching of silicon.



Le  $\text{CF}_4$  a un haut ratio F/C, l'ajout de  $\text{H}_2$  fait réagir le Fluor avec l'Hydrogène ( $\text{HF}$ ) et diminue le ratio du gaz fluorocarboné résultant

Un faible ratio diminue le taux d'attaque du substrat et augmente sa polymérisation → l'ajout de  $\text{H}_2$  permet de contrôler les différentes réactions au sein du plasma

$\text{CF}_4$  dans du plasma + potentiel négatif de 150V au substrat dans la direction verticale + ajout de 10% de  $\text{H}_2$  → taux d'attaque du Si compensé par le taux de polymérisation du Si dans la direction horizontale → Si creusé que verticalement, et donc crée des murs de Si verticaux

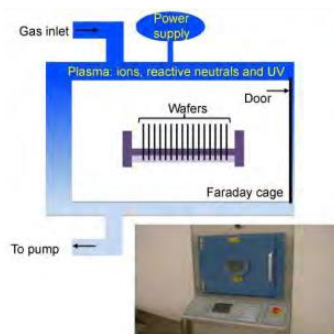


28. Discuss two dry etching processes that do not use plasma generation, namely XeF<sub>2</sub> etching and HF vapor phase etching.

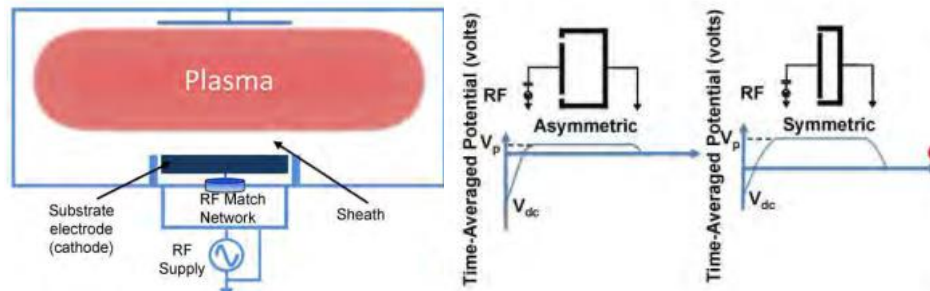
- XeF<sub>2</sub>: Opération plus simple, à partir de cristaux solide de XeF<sub>2</sub> placés à une pression de 4mbar, T ambiante, le XeF<sub>2</sub> se transforme en gaz et va réagir avec le Si → creuse le silicium
- HF : C'est aussi une opération plus simple vu qu'elle ne nécessite pas non plus de plasma, mais on l'utilise sur le SiO<sub>2</sub> et non du Si  
La réaction est contrôlée par la température du wafer  
On place le substrat proche du HF qui s'évapore à T ambiante → phase gazeuse réagit avec le SiO<sub>2</sub> et forme du SiF<sub>4</sub> et du H<sub>2</sub>O gazeux  
On utilise cette technique pour faire des « free-standing » structures → on dépose une fine couche de SiO<sub>2</sub> sur du Si et on crée les structures sur l'oxyde → en injectant du HF gazeux, on peut retirer la couche de SiO<sub>2</sub> et libérer les structures supérieures de silicium

29. Discuss what is a barrel reactor, a diode reactor and an inductively coupled plasma reactor in dry etching.

- **Barrel reactor :**  
Réacteur à plasma qui fonctionne à partir d'un plasma d'oxygène entre 0.1 et 10 mbar  
Le plasma attaque le substrat pour enlever les résidus de polymères et de photorésine grâce aux UV et à l'oxygène → réacteur sans bombardement de ions, le CF<sub>4</sub> peut aussi être utilisé à la place de l'oxygène



- **Diode reactor :**  
Bombardement de ions d'un plasma vers le substrat  
Plasma généré par RF et les ions sont projetés vers le substrat par un potentiel négatif au substrat  
Réacteur symétrique ou asymétrique (si on réduit la taille de l'électrode → rend le plasma inhomogène → attaque du plasma plus importante au centre)

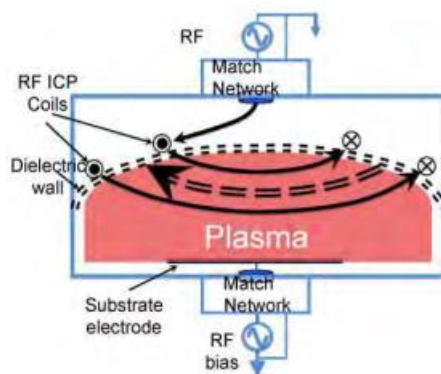


- **Inductively coupled plasma reactor :**

Plasma uniquement sur l'électrode du substrat, on isole l'autre par un mur de diélectrique et une couche de vide → courant RF va induire un contre-courant dans le plasma

Plasma créé par RF et induction électromagnétique → pas besoin de mettre un haut voltage sur l'électrode du bas, il faut une haute densité de plasma

Par rapport à Diode reactor, il y a moins de ions pulvérisant et la couche de substrat est plus fine



### 30. Discuss the technique of ion beam etching (IBE).

Le mécanisme principal du IBE est le physical sputtering dû à la haute énergie cinétique des ions

Jet d'ions concentré et propulsé à très haute vitesse pour attaquer le substrat

On peut utiliser soit des ions réactifs (Cl, F) qui attaquent le substrat chimiquement et physiquement (RIBE = Reactive Ion Beam Etching) soit propulser des ions inerts chimiquement et ajouter un flux de molécules neutre réagissant avec le substrat en plus (CAIBE = Chemically Assisted Ion Beam Etching), on peut contrôler indépendamment le flux de ions et le flux neutre mais le gaz réactif peut diffuser à travers le système et contaminer la source

Basse pression ( $10^{-4}$  – 0.1 mbar), large mean free path

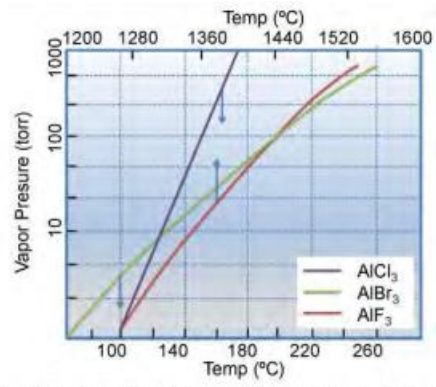
Propulser ions : Plasma généré par induction ou RF, puis accéléré par un fort champ électrique créé par plusieurs grilles à différentes tensions et enfin projeté contre le substrat avec un flux d'électrons neutralisant la charge des ions

Substrat orientable, on peut le creuser à divers angles, localement grâce à la finesse du faisceau mais on ne peut pas faire des réactions qui nécessitent de grosses quantités de réactifs.

Une des limitations de cette méthode est posée par le « low gas flow » quand la pression a besoin d'être à 0.1 mbar, on a besoin d'un haut flux de ions et pas une énergie ionique trop grande pour ne pas abimer le wafer

### 31. Why is chlorine chemistry rather than fluorine chemistry used for the etching of Al and Al alloys?

Le gaz doit réagir avec l'aluminium et les produits de la réaction doivent être faciles à évacuer. Si on utilise du fluor le produit de la réaction avec l'Al sera  $\text{AlF}_3$  qui ne peut s'évaporer qu'à très haute température ( $>1200^\circ\text{C}$ ), alors qu'avec le chlore, on aura du  $\text{AlCl}_3$  qui s'évapore plus facilement à des températures « basses » (quelques centaines de degrés)



Vapor pressure of  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{AlCl}_3$  and  $\text{AlBr}_3$  as function of T  
 (after D.R. Stull, Ind. Engr. Chem., 39, 517, (1947))

## Part VI : Wet etching

### 32.Explain a Piranha wafer cleaning process.

La solution Piranha est une solution composée d'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentré et de peroxyde d'hydrogène  $\text{H}_2\text{O}_2$  capable de réagir violemment avec les composés organiques → solution très utilisée pour nettoyer les wafers de résidus de photorésine ou de contamination organique

La réaction fonctionne en plusieurs étapes

- L'acide sulfurique déshydrate l'eau ( $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{HSO}_4^-$ ) contenue dans les composés organiques
- L'acide sulfurique réagit avec le peroxyde d'hydrogène pour former des atomes O qui attaqueront les atomes de carbones du composé organique

### 33.Explain the HF- and BHF-etching mechanism for glass. How does the etching rate depend on the type of glass and the composition of the etching bath?

La réaction de base encore les solutions HF/BHF et le verre est  $\text{SiO}_2 + 6\text{HF} \rightarrow \text{H}_2\text{SiF}_6 + 2\text{H}_2\text{O}$  (H attaque O et F attaque Si)

Un mélange de HF à 49wt% et de  $\text{NH}_4\text{F}$  à 40 wt% dans un ratio de 1/6 à 1/10 permet de créer du BHF (Buffered HF), une solution fonctionnant comme le HF mais moins agressive, ce qui permet d'utiliser des photorésine comme masque

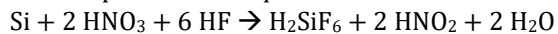
Les « Network Forming Oxide » ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ), présents dans le verre, diminuent la vitesse de réaction

Les « Network Modifying Oxide » ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{BaO}$ ,...), également présents dans le verre, accélèrent la réaction en diminuant la force des liaisons dans le verre

### 34.Explain the mechanism of the HNA-bath for silicon etching.

La solution HNA est un mélange d'acide fluorhydrique HF, d'acide nitrique  $\text{HNO}_3$  et d'acide acétique  $\text{CH}_3\text{COOH}$  (il sert de diluant et peut être remplacé par l'eau)

Le HNA permet d'attaquer le silicium de manière isotropique grâce au HF et  $\text{HNO}_3$



La vitesse de la réaction est déterminée par la concentration de diluant ainsi que par la variation de concentration du composant actif (HF ou  $\text{HNO}_3$ ) minoritaire (composant limitant)

En pratique, la vitesse de la réaction peut varier de quelques  $\mu\text{m}$  à quelques centaines de  $\mu\text{m}/\text{min}$

Il est recommandé d'utiliser des masques en Au ou  $\text{Si}_3\text{N}_4$  pour des attaques chimiques profondes mais on peut utiliser également du  $\text{SiO}_2$

### 35.Explain how one can realize micro-or nano-porous silicon

La réaction du HNA avec le Si est une combinaison d'oxydation du Si par le  $\text{HNO}_3$  en  $\text{SiO}_2$  et de dissolution du  $\text{SiO}_2$  par le HF → on peut remplacer l'oxydation chimique par une oxydation électrique → appliquer une tension positive à du Si dopé P immergé dans une solution de HF → les trous du Si vont migrer vers l'interface Si-HF et remplacer la réaction Si- $\text{HNO}_3$

On peut appliquer le même principe pour du Si dopé N mais il faudra appliquer une tension positive beaucoup plus importante appelée tension de « Breakdown » pour lancer la réaction, ou l'utilisation de lumière excitant le Si

Pour réaliser des nano-pores dans le Si, on contrôle la tension de façon à ce que la réaction se déroule partiellement

Pour le Si dopé N → la méthode utilisée pour initier la réaction va déterminer la taille des pores → si on utilise une forte tension (« breakdown ») on créera des trous plus gros (micro-pores), mais si on utilise une lumière excitante, on créera plutôt des nano-pores, très similaires au cas du Si dopé P

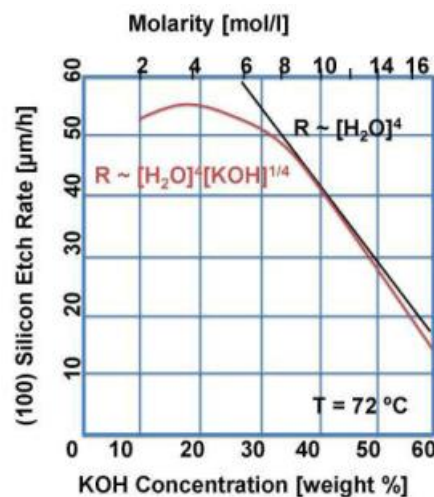


### 36. Explain the mechanism of the KOH-bath for silicon etching. What is the influence of KOH concentration on the etching rate?

Le KOH pour attaquer le Si a l'avantage d'être fortement anisotropique → Le Si ne possède pas la même configuration spatiale au niveau atomique en fonction des plans de Miller considéré → Dans le plan (111) un atome de Si situé à une interface aura 3 liaisons internes avec d'autres atomes de Si et une liaison « flottante » → Si l'interface est orientée dans le plan (100) l'atome de Si n'aura que deux liaisons internes et deux liaisons flottantes → Provoque une attaque chimique plus difficile dans le plan (111) que dans le plan (100) → La solution de KOH est beaucoup plus rapide sur un plan (100) que sur un plan (111)

Les solutions comme le NaOH, LiOH, CsOH peuvent aussi être utilisées

Solutions de KOH : 20 wt% KOH, 16wt% propanol, 64 wt% eau, le tout à 80° → Si on a une concentration trop élevée en KOH, la vitesse de réaction diminuerait

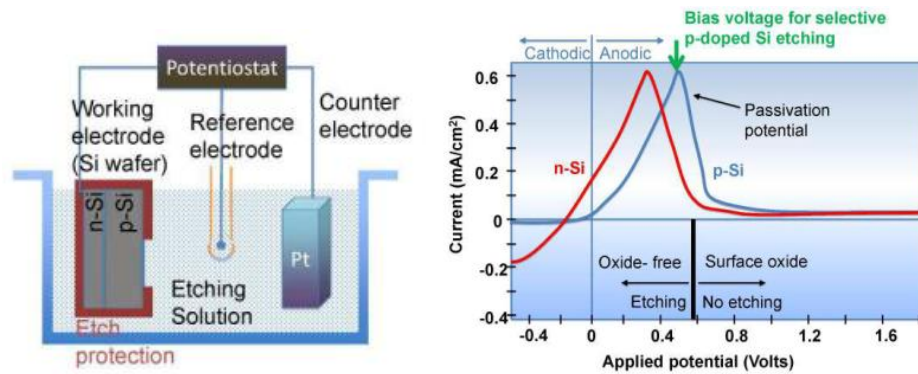


### 37. Explain two types of etch stop techniques for making thin membranes in silicon using a KOH wet etching bath.

- Technique 1: Implantation de Bore dans du silicium**  
 Les électrons « tunnelisent » dans la bande de valence et recombinent avec des trous plutôt que de rester à la surface du Si pour la régénération des ions  $\text{OH}^-$   
 Peut importe la concentration de KOH, l'etch rate va quand même baisser en augmentant la concentration de Bore mais les hautes concentrations baissent moins vite  
 Une haute concentration de bore dans du silicium n'est pas compatible avec des éléments Cmos ou bipolaires et cela réduit la qualité du cristal

	Basse concentration Bore	Haute concentration Bore
Haute concentration KOH	Moyen-haut etch rate	Moyen-bas etch rate
Basse concentration KOH	Haut etch rate	Bas etch rate

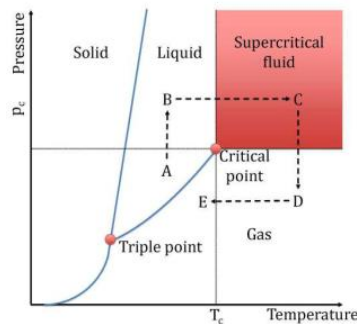
- Technique 2 : Electrochemical etch stop**  
 Une couche dopée P déposée sur une couche dopée N  
 Protection anti-etch ne laisse à découvert que la partie à graver  
 Tension positive appliquée au wafer, tension de référence dans la solution  
 L'acide rongé en suivant les plans (111) du silicium P mais s'arrête à la couche de silicium N : le potentiel positif est en-dessous de la tension de passivation du silicium P, donc produit des trous à l'interface Si-Solution, ce qui attire des ions hydroxyles et crée du  $\text{SiO}_2$  (→ etching) mais elle est au-dessus de la tension de passivation du silicium N (passivation par formation d'un oxyde à la surface car le courant dans le N-Si a chuté), ce qui laisse la couche N intact



### 38. Explain the principle of supercritical drying in surface micromachining.

En séchant/rinçant les résidus de solution après enlèvement d'une couche sacrificielle, on risque de déformer la structure, déjà sous stress résiduel, par des forces capillaires

- Couche sacrificielle rongée dans un bain de HF
- HF remplacé ensuite par de l'eau déionisée (on remplace de liquide par un liquide → pas de séchage)
- L'eau est remplacée par de l'alcool éthylique (plus basse tension de surface que l'eau, plus haute pression de vapeur)
- On met le wafer dans une chambre avec du gaz CO<sub>2</sub>
- On baisse la température de 10°C et on augmente la pression à 75 bar pour remplacer l'alcool avec du CO<sub>2</sub> liquide
- On augmente la température à 31°C pour faire passer le gaz à l'état supercritique (supercritique = pas de tension de surface)
- On fait baisser la pression pendant 4min pour faire passer le gaz de supercritique à gazeux
- On fait revenir la température à température ambiante
- ➔ On a évité de faire sécher le gaz en le faisant passer de liquide à gazeux directement



### 39. Discuss how one can etch in a (100) silicon substrate simultaneously microstructures with tilted side walls and vertical side walls during the same KOH etching process.

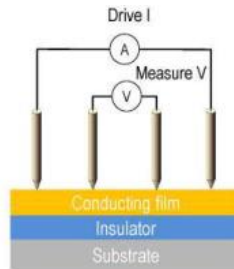
Pour les structures pour lesquelles on veut avoir des parois penchées dans des plans [111], on aligne un masque rectangulaire dans la direction <110> pour que les plans [111] soient les faces limites. Pour avoir des parois verticales, on oriente le masque rectangulaire dans la direction <100> (on le tourne de 45° comparé au masque précédent), les faces seront délimitées par les plans [001] et [010] → Si on laisse tremper trop longtemps on va finir par atteindre les plans [111] et ça redonnera des faces penchées → les parois verticales sont un état intermédiaire.

## Part VII : Inspection and Metrology

40. You need to measure the electrical conductivity of a thin film. What techniques can you apply ?

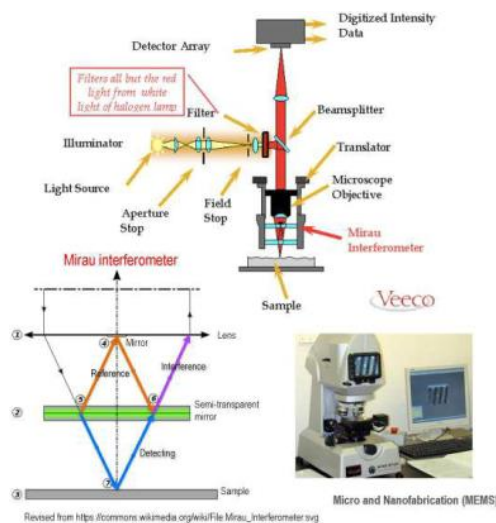
- Van de Pauw 4 point prob measurement : 4 aiguilles en ligne espacée de 1mm l'une de l'autre, une source de courant bien précise émet entre les deux aiguilles externes, un voltmètre calcule la chute de tension entre les deux aiguilles internes

$$R_s = \frac{\pi \cdot V}{I \cdot \ln 2}, \rho = R_s t$$



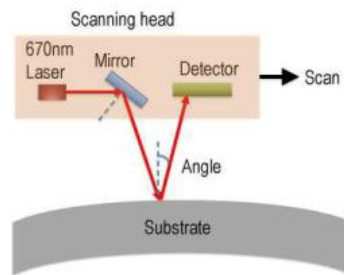
41. You need to measure the surface profile of a microstructured thin film, what methods can you apply ?

- White Light Interferometric light profiler (WLI)  
 La lumière qui passe à travers l'interféromètre Mirau est focalisée par les lentilles et est ensuite divisée en deux faisceaux en utilisant un semi-transparent miroir  
 Le faisceau de référence est en orange tandis que le faisceau de l'objet est en bleu (schéma en dessous)  
 Si la surface est plate, les trajets de la lumière des faisceaux de référence et de l'objet sont totalement identiques → interférence constructive  
 Si la surface n'est pas plate, la différence entre les deux trajets n'est pas nulle, l'intensité de l'interférence (en violet) va changer et sera détectée par un light intensity detector  
 → On ne peut pas utiliser des faces avec un angle plus grand que 45°  
 → Le SiO<sub>2</sub> est transparent → la lumière va le traverser et aura donc un trajet plus long à cause de l'indice de réfraction



- Laser Beam surface Profiler (LBP)  
 Il permet également de déterminer la courbure de la surface en cas de stress

Un faisceau laser est aligné par rapport à la surface et le faisceau réfléchi (à la surface) est détecté  
En fonction de la courbure de la couche, le laser va toucher une partie plus ou moins éloignée du détecteur



Stoney equation:

$$\sigma_f = \frac{E_s}{6(1-\nu_s)} \cdot \frac{t_s^2}{t_f} \left( \frac{1}{r_{sf}} - \frac{1}{r_s} \right)$$

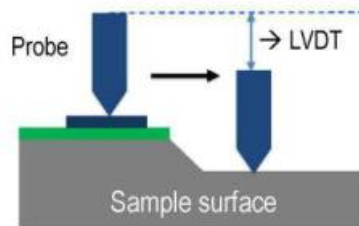
$\sigma_f$  = stress in film in [Pa], by convention negative stresses are compressive  
 $E_s$  = substrate Young's modulus in [Pa]  
 $\nu_s$  = Poisson ratio of the substrate  
 $t_f$  and  $t_s$  = film and substrate thickness in [m]  
 $r_{sf}$  = radius of curvature of the substrate with the thin film in [m]  
 $r_s$  = radius of curvature of the substrate before deposition in [m]

- Mechanical surface profiler

Une aiguille en diamant scanne selon un trajet linéaire en contact avec la surface

Linear Variable Differential Transformer (LVDT) est utilisée pour mesurer le déplacement de la pointe

Risque d'endommagement du substrat à cause du contact, résolution jusqu'à 1nm

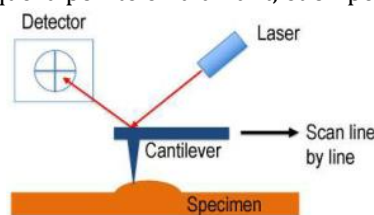


- Atomic Force Microscopy (AFM)

L'AFM touche la surface avec une force très très faible (force feedback) qui n'abîme pas la surface  
Une pointe au bout d'un cantilever touche la surface et le cantilever se courbe en fonction du profil de la surface

La courbure est mesurée par le laser beam deflection

Elle a une meilleure résolution que la pointe en diamant, et on peut aussi mesurer la rugosité



42. You need to know the thickness of a silicon nitride film of a given refractive index  $n$ , what methods can you apply ?

- Reflectometer & transmittometer:

On illumine la surface avec une lumière polychromatique d'une longueur d'onde allant de 200 à 1100 nm

Le réflectomètre détecte le changement d'intensité de la lumière réfléchi par rapport à la source

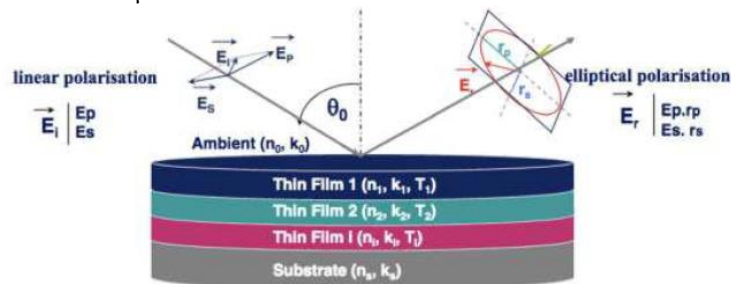
La variation d'intensité vient des interférences à travers le film

On peut mesurer des épaisseurs allant de 1nm à 40μm

→ photorésine, SiO<sub>2</sub>, polymères, films diélectriques



- Spectroscopic ellipsometer:  
 La lumière incidente est inclinée, ce qui induit un changement de polarisation après la réflexion  
 La polarisation linéaire de la lumière incidente est changée en une polarisation ellipsoïdale pour la lumière réfléchie  
 La longueur d'onde utilisée varie de 190nm à 2000nm → on peut mesurer des épaisseurs de quelques Angstrom à 50μm  
 On peut aussi mesurer d'autres informations comme la rugosité, la composition  
 → dielectric optically transparent thin films, metal thin films  
 Spot size de la lumière : 400μm



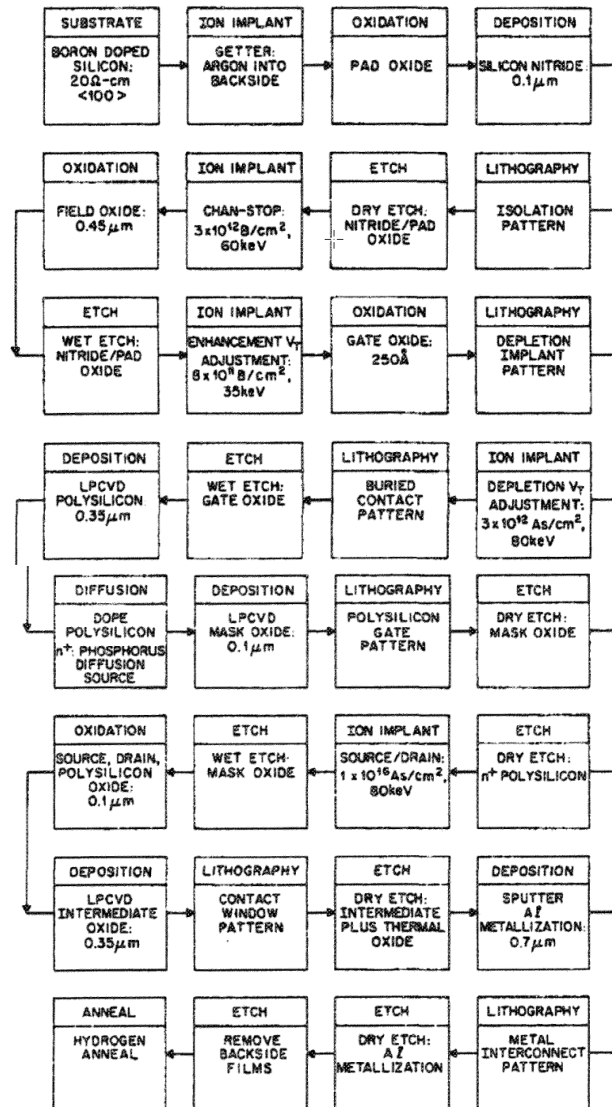
43. You need to know the surface roughness with highest possible resolution. What methods can you apply ?

Le moyen le plus précis est l'AFM

Le spectroscopic ellipsometer peut aussi déterminer la rugosité mais est moins précis  
 (taille pointe AFM < light ellipsometer)

## Part VIII : IC history and fabrication

44. Discuss the microfabrication of a NMOS inverter. What is the role of each of the masks needed?



### 1. Choix du substrat

Silicium faiblement dope ( $5 \cdot 10^{14} - 10^{15}$  atomes/cm<sup>2</sup>) de type p

Wafer dont l'orientation cristalline est <100>

Faiblement dopé = faible capacité entre la source et le drain, tension de claquage élevée, bonne mobilité, peu sensible aux effets de bias entre la source et le substrat

### 2. Zones d'isolation

Définition des régions actives et des régions d'isolation

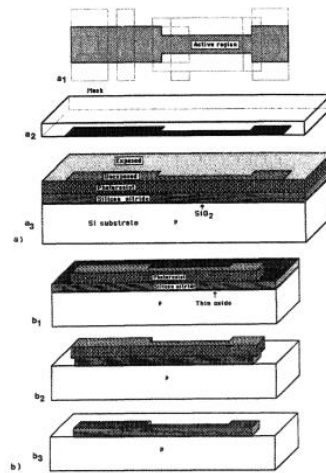
Régions d'isolation définies par oxydation sélective par LOCOS

Fine couche d'oxyde tampon déposée par CVD puis recouverte par couche de nitrure de silicium par CVD

Masque 1 sert à dessiner la résine qui délimite les zones à graver par voie humide

Bore implanté sur tout le wafer pour créer des stop channels dans les régions de champs

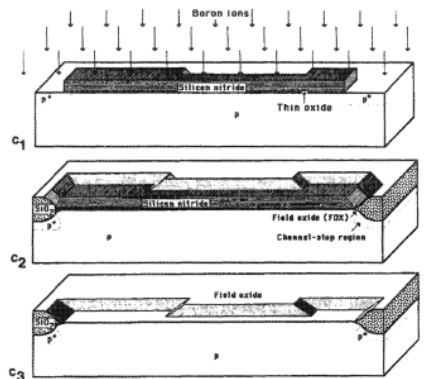




### 3. Croissance de l'oxyde épais

Oxydation thermique, croissance d'un oxyde épais aux endroits précédemment gravés → formation d'un relieur en forme de bec d'oiseau

Graver tout le nitrure restant et l'oxyde tampon



### 4. Croissance de l'oxyde de grille et ajustement de la tension de seuil

Partie active nettoyée par gravure humide pour enlever traces d'oxyde

Croissance douce et prudemment de l'oxyde de grille par oxydation sèche en milieu chloré

Tension de seuil du transistor en accumulation ajustée par implantation de bore

Aucun masque utilisé, oxydes assurent la protection des autres zones

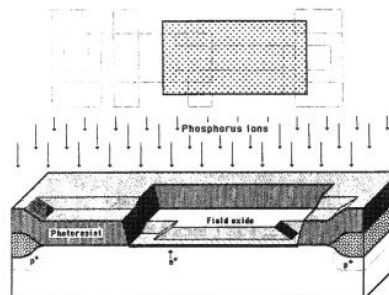
Tension de seuil du transistor ajustée par une implantation de phosphore ou d'arsenic

### 5. Réalisation du canal

Recouvre le wafer d'une couche de résine photosensible

Utilise masque 2 pour réaliser la zone de déplétion ou canal

La zone de déplétion qui doit être implantée est l'intersection de la fenêtre du masque 2 et de la zone active



### 6. Réalisation des contacts enterrés

Les contacts enterrés sont ouverts dans l'oxyde de grille en utilisant masque 3 de façon à obtenir par la suite les contacts électriques entre la zone active et la couche de polysilicium

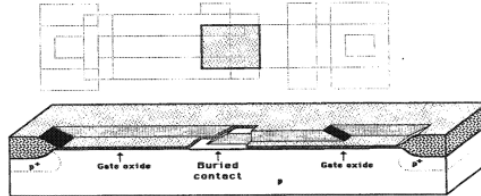
## 7. Dépôt du polysilicium et réalisation de la grille

Une couche de polysilicium est déposée par CVD sur toute la surface du wafer

Le polysi est dopé par du bore (implantation ionique ou diffusion) pour diminuer la résistance du polysi

Structure de la grille et structures d'interconnexions en polysi sont dessinées pendant la 4<sup>ème</sup> étape de photolitho avec le masque 4

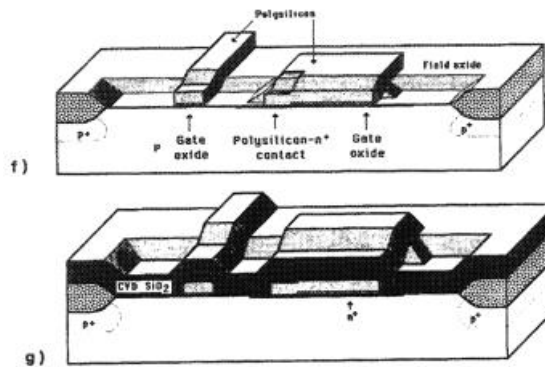
Polysi gravé par voie humide, la longueur de la grille doit être rigoureusement la même sur tout le wafer et le profil de la grille en polysi gravé doit être vertical de façon à protéger la grille des implantations ultérieures nécessaires pour réaliser la source et le drain



## 8. Formation du drain et de la source

Implantation ionique sans étape de lithographie → l'oxyde de champ et le polysi de la grille jouent le rôle de masques

Seules les zones actives, recouvertes seulement par l'oxyde de grille et non par le polysilicium sont implantées de manière importante

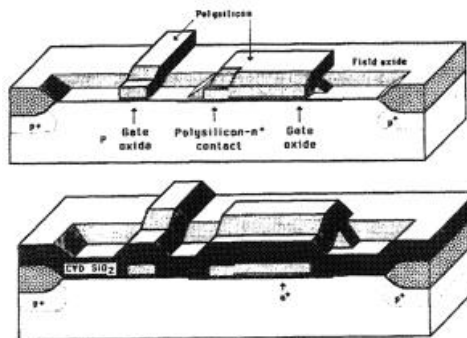


## 9. Diffusion des dopants

Recuit destiné à activer les atomes implantés et à ajuster la position de la jonction drain source

Certains dopants p du polysi diffusent dans le silicium → enrichit la zone n+ située sous le polysi → contribue à la formation d'un meilleur contact électrique

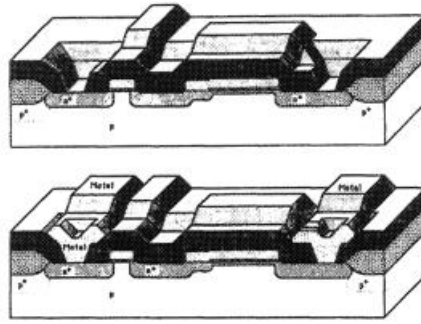
Après la formation du drain et de la source, une couche de SiO<sub>2</sub> dopée au phosphore ou dopée au phosphore et au bore est déposée par CVD → isolation électrique, ions sodium piégés par le verre dopé qui se comporte comme matériau visqueux



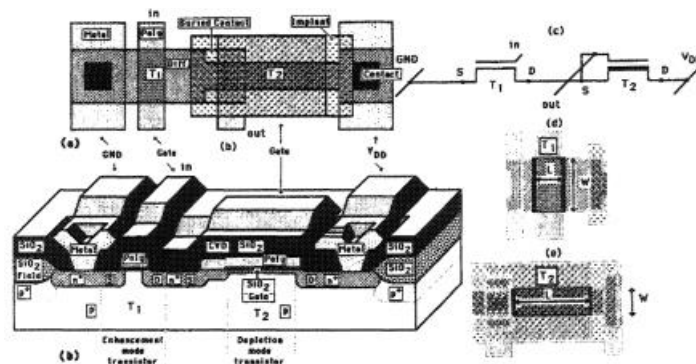
## 10. Ouverture des contacts

Créées par une étape de lithographie suivie d'une gravure

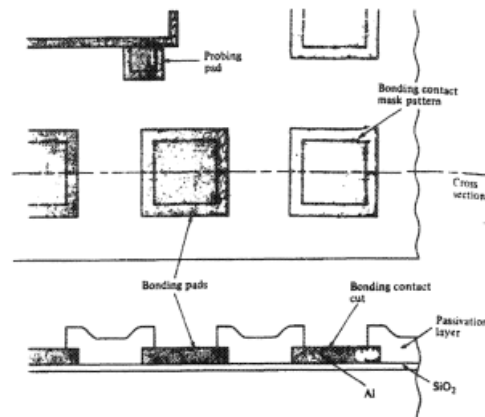
Remet une couche d'oxyde de silicium vitreux dopé pour avoir une fenêtre de contact bien nette



11. Métallisation des pistes de connexion  
 Une couche de métal (Al + Si) déposée  
 Les pistes d'Al dessinées par photolitho  
 Al gravé chimiquement, humide ou sèche  
 Contacts Al-Si effectués



12. Couche de passivation et masque tampon  
 Une couche de phosphosilicate ou de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  est déposée par CVD pour protéger surface wafer des différents contaminants et de l'humidité  
 Ouvertures gravées en périphérie des circuits pour former les tampons de soudage destinés aux fils de connexion entre le circuit et l'extérieur



45. Discuss what is the difference between a gate oxide and a field oxide in a transistor microfabrication process. How are these oxides made?

Gate oxide: couche d'oxyde fine entre le polysi et les canal ou substrat

Fiel oxide : couche épaisse d'oxyde (0.5-1 $\mu\text{m}$ ) pour la séparation entre deux transistors pour éviter des effets de champ

#### 46. Discuss why a CMOS inverter is preferred over a NMOS inverter circuit.

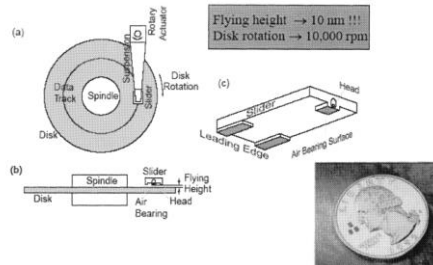
L'inverseur CMOS dissipe encore moins d'énergie que l'inverseur NMOS (un des transistors est toujours passant et donc consomme de la puissance en permanence) En CMOS les deux transistors ne sont jamais passants en même temps, donc il y a toujours une forte impédance entre  $V_{dd}$  et la masse  
Quand l'inverseur ne fonctionne pas, il n'y a pas de courant qui passe dans le circuit donc pas de puissance dissipée

## Part IX : Hard Disk Drives and Memory

### 47. Discuss the mechanical and electromagnetic aspects of a hard disk head and drive.

- **Mécanique:**

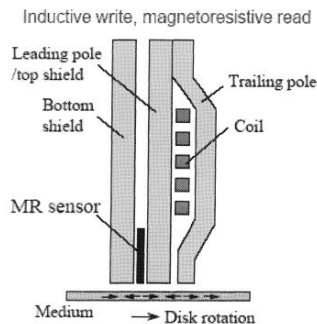
Le disque tourne vite, le bras se positionne par un actionneur angulaire, la tête lectrice est soutenue par un coussin d'air à 10nm au-dessus du disque



- **Electromagnétique :**

La surface ferromagnétique se déplaçant en dessous de la tête, la lecture se fait en détectant les champs magnétiques émis par chaque grain de la surface via la magnétorésistance

Pour écrire, la bobine émet un fort champ magnétique pour modifier celui contenu dans les grains



### 48. What is the superparamagnetic limit of the disk material in hard disk recording. How did magnetic disk materials evolve over the years to satisfy the ever increasing memory density?

Une particule magnétique est superparamagnétique si la barrière d'énergie magnétique est comparable à  $k_b T$

La limite superparamagnétique est la durée de vie d'un grain de mémoire, représentée par la probabilité par unité de temps et selon la température que le champ magnétique à l'intérieur de celui-ci s'inverse et donc que l'information soit corrompue

#### Superparamagnetic limit

Probability of magnetization reversal per unit time

$$f = f_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)$$

Attempt freq.  $f_0 \sim 10^9$  Hz,  $\Delta E$  is energy barrier,  $kT$  is thermal energy.

Mean time for spontaneous magnetization reversal

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right) \quad \tau_0 = 1/f_0$$

**Inductive head technology:**

Lubricant ~ 20 Å
Carbon overcoat ~ 275 Å
Magnetic layer ~ 500 Å CoX, CoCrY
NiP ~ 10 µm
Al substrate

- Vacuum sputter deposition techniques were developed
- Co and Co alloys have been used as thin film media (CoCrPt, CoNiCr, and CoPtNi)
- Film thickness ~ 500 Å on NiP plate on Al substrate

### Resistive head technology:

Lubricant ~ 20 Å
Carbon overcoat ~ 70 Å
Top magnetic layer ~ 100 Å
Spacer layer ~ 0 - 20 Å
Bottom magnetic layer ~ 100 Å
Intermediate layer ~ 50 Å
Under layer ~ 100 Å
Seed layer ~ 100 Å
Substrate

magnetic media of small grain size is required  
small signal-to media noise design  
CoCrPtTa, CoCrPtB alloys are used as magnetic media

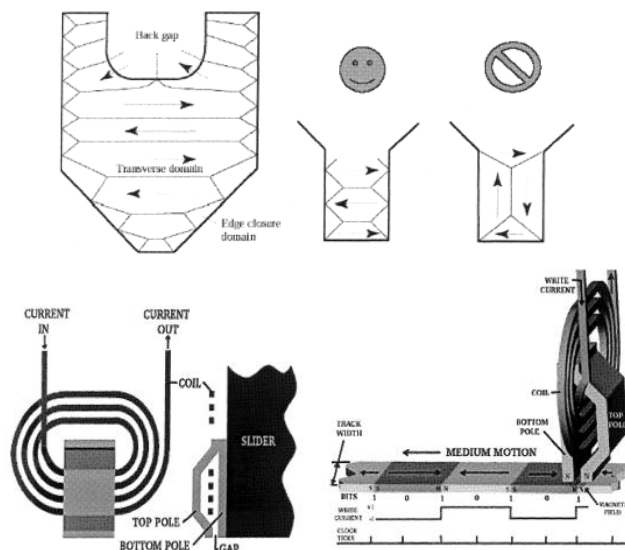
La taille de grains doit diminuer pour augmenter la densité d'information, on contrôle cette taille avec des « seed layer »

Pour réaliser des grandes densités d'enregistrement avec un ratio signal-bruit acceptable, on choisit des matériaux avec une haute anisotropie et coécivité et des petits grains uniformes à découplage d'échange. Une autre technique consiste à placer des petites couches de Ru entre deux couches magnétiques pour augmenter la densité de courant surfacique.

### 49. Discuss three different types of magnetic reading heads in hard disk recording.

- **Inductive heads**

Une simple bobine, peut être utilisée pour l'écriture et la lecture.

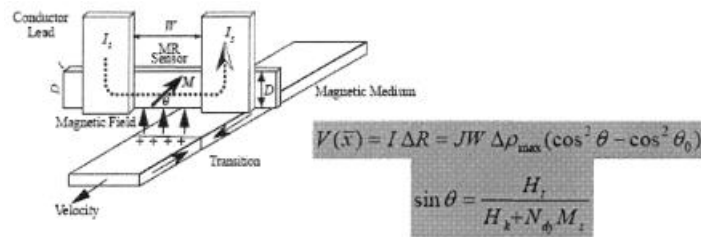


Can be used for both writing and reading

- **Magnetoresistive heads**



Certains métaux exposés à un champ magnétique changent leur résistance au flux de l'électricité  
 → on peut utiliser cette propriété pour lire les éléments du disque



- **Giant magnetoresistive heads**

Effet décrit dans les multicouches magnétiques : la résistance est réduite avec l'augmentation de la valeur absolue du champ magnétique

### GMR: mechanism

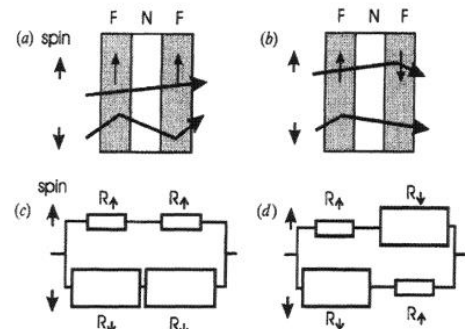
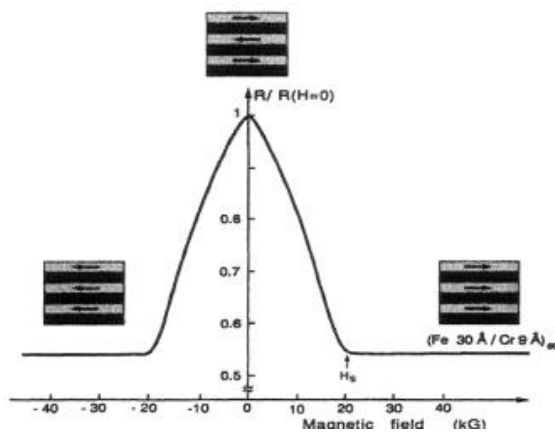


Figure 1. Origin of the giant MR in terms of spin-dependent electron scattering: F, ferromagnetic layer; N, normal-metal layer. At zero magnetic field the magnetizations in the multilayer must be aligned antiparallel as in (b) but can be switched by a weak applied field to a parallel orientation as in (a). The equivalent resistance circuits corresponding to the situation (a) and (b) are given in (c) and (d) respectively.

## Part X : Displays

50. Discuss the principle of a Liquid Crystal Display (LCD) and a Liquid Crystal on Silicon (LCOS) display.

- **LCD**

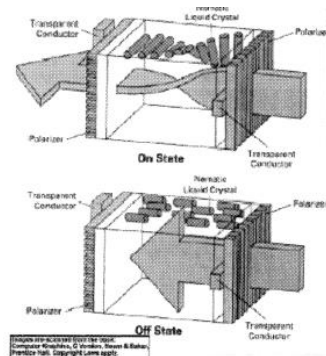
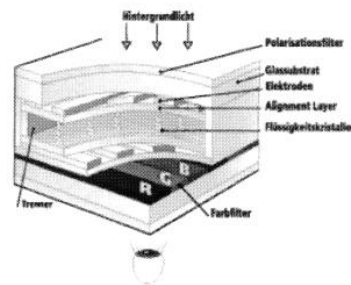
Structure stratifiée, multicouche avec rétroéclairage

Une lumière non polarisée frappe le filtre de polarisation

Le voltage induit une structure LC twistée

Une lampe RGB sert de filtre de couleur

RGB-foil serves as color filter



La lumière non polarisée traverse un filtre de polarisation, puis traverse une couche de cristaux liquides dont l'orientation est contrôlée avec un voltage

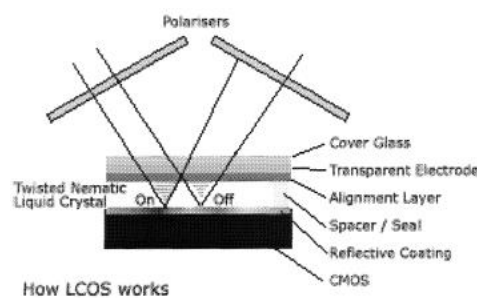
S'ils sont alimentés, ceux-ci se twistent et guident la polarisation pour que la lumière puisse traverser le deuxième polarisateur à 90° du premier

Si ce n'est pas alimenté, la lumière n'est pas twistée et ne peut pas traverser le deuxième polarisateur.

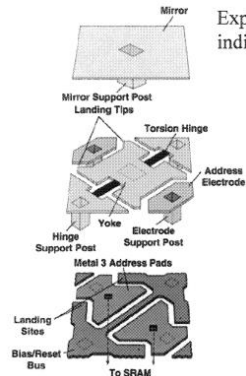
Moins de power consumption, pas d'émission de champs magnétique ou électrostatique

- **LCOS**

Combinaison entre le LC et le IC, ils sont plus facile à faire que les LCD, ils ont une meilleure résolution parce qu'on peut mettre plusieurs millions de pixels sur un chip (puce), ils peuvent être plus petits que les LCD

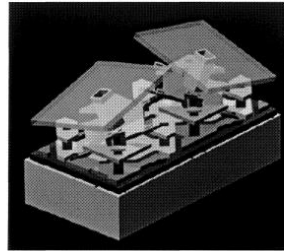


51. Discuss the principle and microfabrication process of the Digital Micromirror Device (DMD).



Exploded view of an individual mirror on a DMD

A blow-up of two mirrors on the DMD, one "on" and one "off"



Microsystème permettant la projection d'une image numérique par réflexion des pixels sur des micromiroirs qui peuvent basculer sur 2 positions différentes (on, off) → miniaturisation des vidéoprojecteurs

Puce entièrement numérique

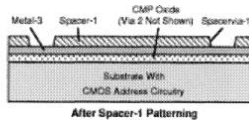
La surface contenant les micromiroirs est éclairée par une source de lumière, chaque miroir peut prendre deux positions, il s'incline de 10-15° pour réfléchir la lumière soit vers une lentille de diffusion soit vers une surface absorbante

Pour les niveaux de gris, les micromiroirs vont commuter pendant une période bien définie à fréquence élevée

Les miroirs sont tous manipulés indépendamment les uns des autres

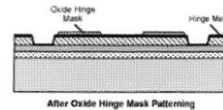
### DMD process flow 1

- Low-temperature surface micromachining process: enables to use underlying CMOS circuits inclusive their Al interconnects
- Mechanical elements: sputter-deposited Al alloys
- Sacrificial layers: deep UV-hardened photoresist
- Thick oxide is deposited over metal 2 of the CMOS circuit
- Oxide is planarized using Chemical Mechanical Polishing (CMP) → provides flat substrate
- Sputtering of Al (Metal-3) layer
- Patterning of sacrificial photoresist layer (Spacer-1)

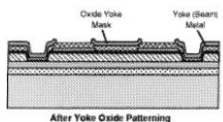


### DMD process flow 2

- Sputter deposition of Al hinge metal layer
- Patterning of SiO<sub>2</sub> oxide hinge mask



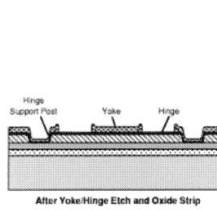
- Sputter deposition of Al yoke (beam) layer
- Patterning of SiO<sub>2</sub> beam mask



### DMD process flow 3

ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

- Etching of Al beam layer (e.g. in plasma)
- Etching of oxide Yoke mask (e.g. in HF)



After Yoke/Hinge Etch and Oxide Strip

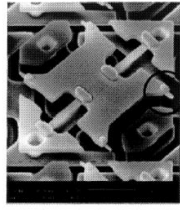
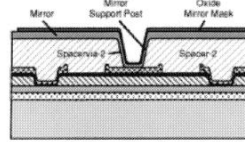


Figure 11. Closeup image of a micromirror landing tip showing a spring tip. The spring not only absorbs energy during landing but stores energy for more efficient mirror release.

### DMD process flow 4

ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

- Deposition and patterning of photoresist sacrificial layer (Spacer-2)
- Sputter deposition of Al mirror layer
- Deposition of SiO<sub>2</sub> oxide Mirror Mask

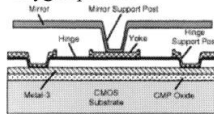


After Mirror Oxide Patterning

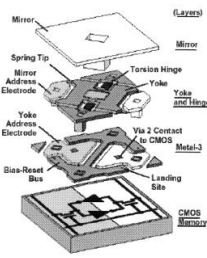
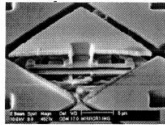
### DMD process flow 5

ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

- Etching of Al Mirror layer (in plasma)
- Removal of the two sacrificial photoresist layers in an oxygen plasma



Completed Device



### DMD packaging

ÉCOLE POLYTECHNIQUE  
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

- *Partial* sawing of chips on wafer
- Plasma etch of sacrificial photoresist layers
- Deposition of self-limiting anti-adhesion PDFA layer
- Electrical testing
- Chips broken from wafer !
- Plasma cleaning
- Repassivation
- Adhesive bonding to package
- Wire bonding
- Apply moisture getter material in package
- Weld an optical quality glass plate



## Part XI : Bio-chips

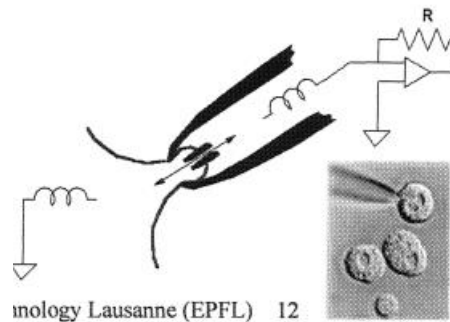
52. Discuss the classical (manual) patch clamp technique for measuring ion currents through cell membranes and the microsystem-based patch clamp technique. How can patch-clamp chips be realized?

- **Classical path clamp**

Pipette en verre remplie d'électrolytes (pour garder le potentiel électrique dans la pipette constant) jointe à un circuit électrique, et connectée à un amplificateur

Un bout de la membrane cellulaire est aspiré dans la pipette, le potentiel électrique dans la pipette est gardé constant

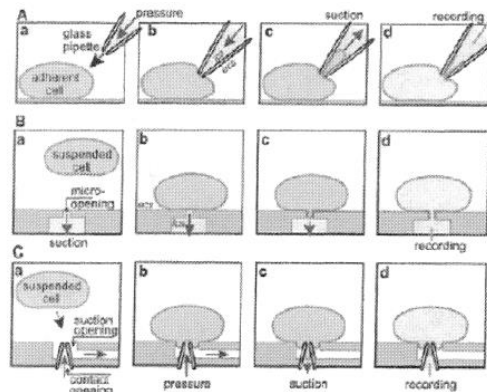
Output signal = courant de la membrane



- **Microsystem-based patch clamp**

Petite cuvette qui sert à empêcher la cellule de s'échapper avec au fond un tout petit tube qui va aspirer la cellule et se ventouser à sa membrane, le dispositif est fixe, c'est la cellule qui est aspirée/recrachée

La cellule peut être expulsée et les résidus de membrane peuvent être nettoyés de la cuvette pour réutilisation



• A: Classical

• B,C:  
Microsystem

53. Discuss how extremely smooth surfaces can be realized for contact with cells on a chip during patch clamp measurements. What is the role of the so-called Giga-Ohm sealing condition?

Pour les microsystèmes, on commence par oxyder les parois verticales du silicium pour avoir du  $\text{SiO}_2$  à la surface duquel se trouve des groupes silanol et des liens siloxane

Un traitement au plasma d'oxygène transforme les groupes siloxane en groupes silanol (hydrophilie favorise l'adhésion de la cellule à la paroi)

$\theta < 10^\circ$ : très hydrophile;  $\theta \sim 30^\circ$ : modérément hydrophile



Recouvrement par du PDMS puis traitement au plasma → le PDMS normal est très hydrophile pendant 25 minutes, avec traitement plasma, il l'est pendant 50min → effet temporaire

Giga-seal : plus la membrane cellulaire est collée à la paroi de l'embout, plus la résistance de contact (Giga-ohm) et moins les fuites de courant sont grandes → + précis

## Part XII : Nanoscale MEMS and NEMS

### 54. Describe the principle of the atomic force microscope (AFM) and the method to fabricate nanometer sharp tips.

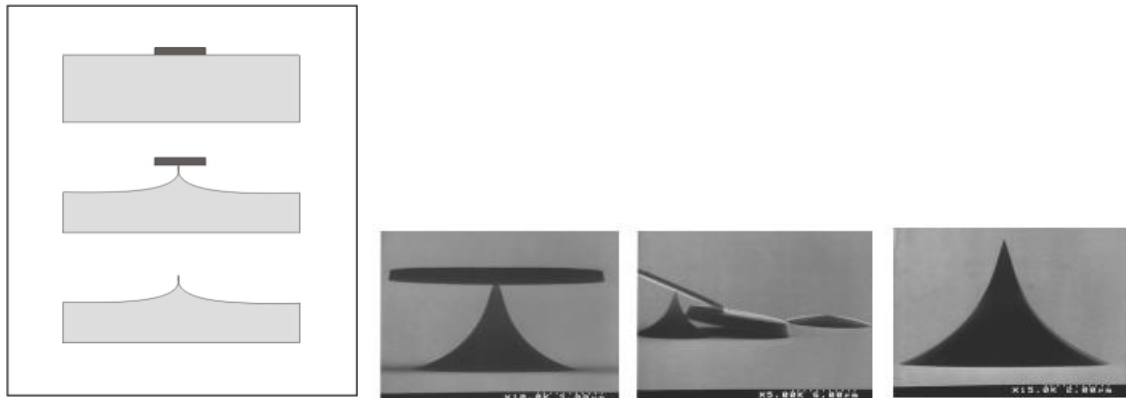
L'AFM touche la surface avec une force très très faible (force feedback) qui n'abime pas la surface

Une pointe au bout d'un cantilever touche la surface et le cantilever se courbe en fonction du profil de la surface

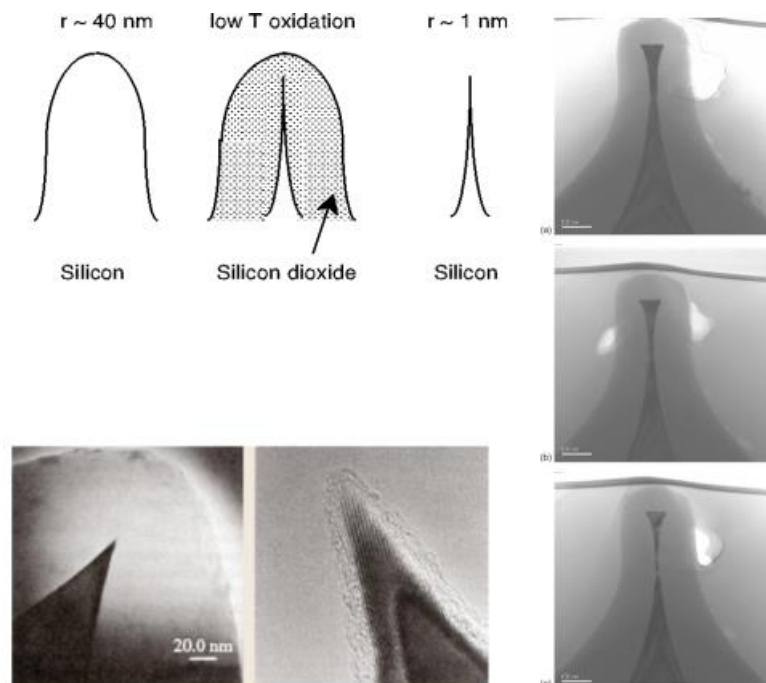
La courbure est mesurée par le laser beam deflection

Fabrication sharp tip :

**Erosion** : masque de gravure, gravure sèche ou humide



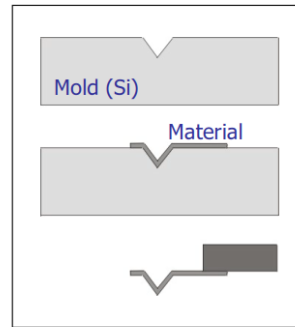
**Aiguiser** : aiguiser la pointe par oxydation, croissance d'un oxyde de silicium sur la pointe puis érosion de celui-ci par wet etching dans le HF



**Moulure de la pointe par gravure** : → donne une pointe pas effilée



- Define mold by etching
  - inverted pyramid (anisotropic etching KOH)
- Automatic etch stop at <111> etch planes Si
- Good large area uniformity
- Filling mold with appropriate material
  - Silicon nitride
  - Silicon oxide
  - Metal
  - Polymers
- Release process of thin film
- keep mold, replication



## 55. Describe the principle of bottom-up self-assembly using templates and nanoparticles.

**Bottom-up fabrication:** le bottom-up laisse les particules s'assembler et former des structures d'elles-mêmes mais en contrôlant les paramètres dans le but de respecter un pattern déterminé auparavant (Top-down : tout est contrôlé du début jusqu'à la fin pour respecter un certain pattern prédéterminé en influençant la matière par des lasers, EBW, FIB, SPL,...)

Self-assembly = “autonomous and spontaneous organization of components into patterns and structure” = “Self organised formation of high-order structures from pre-existing parts, which is adjustable and controllable by the design of components, environment and forces”

Thermodynamics

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

**G = free energy**

**H = enthalpy**

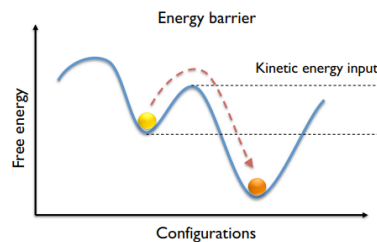
- bonds

**T = temperature**

- agitation

**S = entropy**

- configurations



Self assembly avantages pour les microsystemes : accomplir des tâches uniques, large variété d'interactions (gravité négligeable, forces peuvent être réglées), effet de levier sur les tâches d'usinage standard (haute précision et vitesse de production)

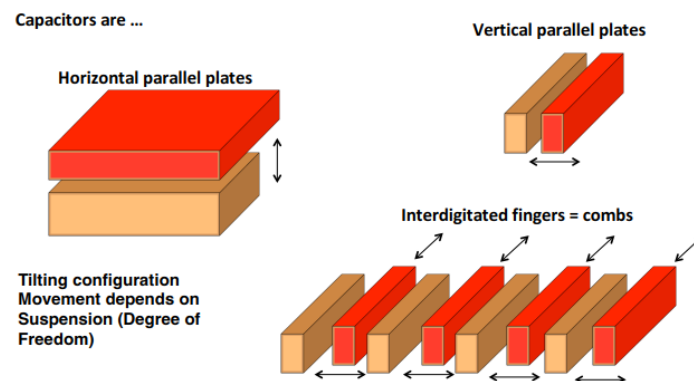
## Part XIII : Mechanical MEMS

56. Describe the principle of a capacitive sensor (Analog Devices and/or Colibrys version) and the key fabrication methods involved.

On détecte le mouvement par changement de capacité  
Plusieurs modèles de capteurs capacitifs existent :

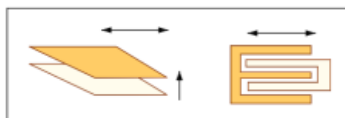
$$C = \frac{\epsilon A}{g}, A = \text{area}, \epsilon = \text{cste diélectrique}, g = \text{gap}$$

La configuration la plus utilisée est en peigne, cela amplifie la différence de capacité

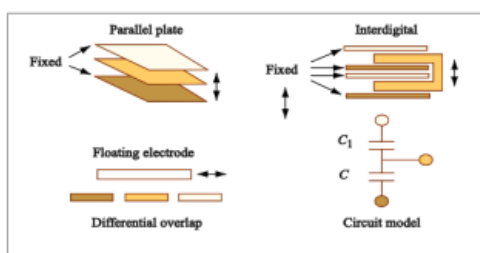


On trouve soit des capacités seules (capacitance est une fonction du gap ou de l'aire) soit des capacités différentielles (capacité augmente pendant que l'autre diminue)

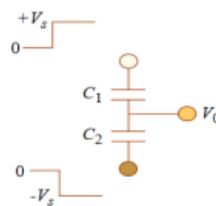
Seule :



Différentielle :



Formule capacité différentielle :

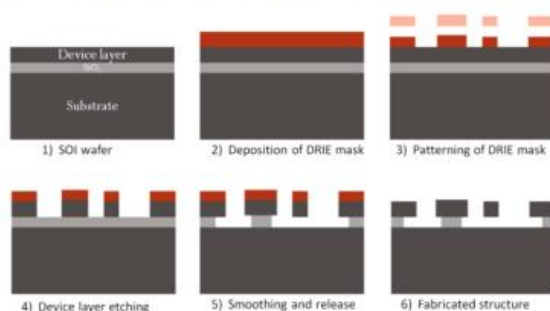


$$V_0 = -V_s + \frac{C_1}{C_1 + C_2} (2V_s) = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} V_s$$

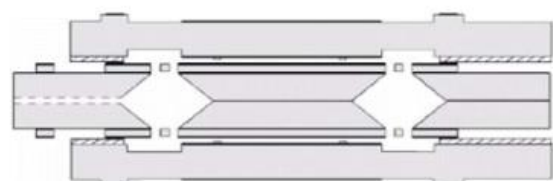
for parallel-plate capacitors where only  $g$  changes, this becomes

$$V_0 = \frac{g_2 - g_1}{g_1 + g_2} V_s$$

Etapes de fabrication-clé du peigne capacitif :



Senseur Colibrys :



(Très sensible, coût de fabrication haut et taille du chip grande)

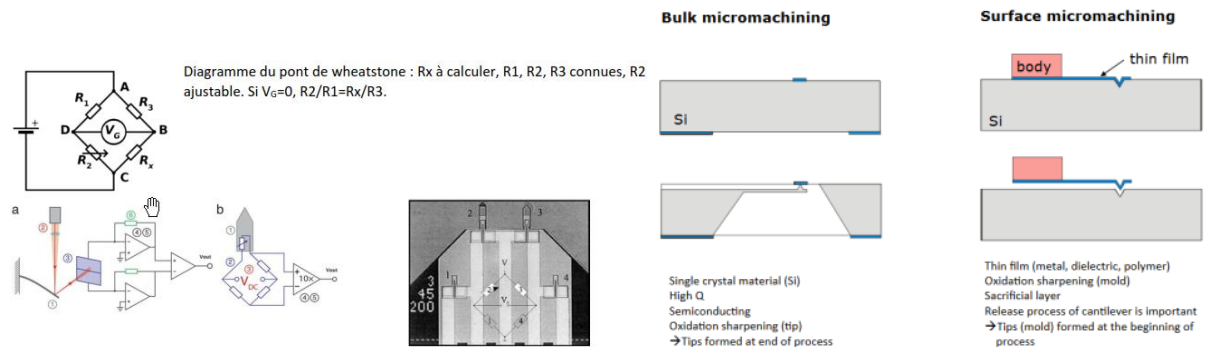
## 57. Describe the principle of a piezoresistive cantilever sensor and the key fabrication methods involved.

Poutre qui change de résistivité quand elle se plie

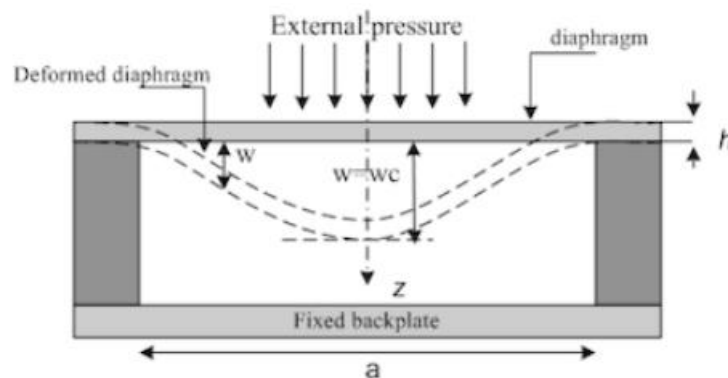
Mesurer la résistivité

La température ne doit pas influencer la résistivité pour éviter de fausser les mesures

Quand une force est appliquée sur le cantilever, une tension/compression du levier s'ensuit → piezorésistance est étirée/comprimée et sa résistance change



## 58. Describe the principle of a pressure sensor and how it can be fabricated.



Un changement de pression implique une tension/compression et donc un changement de résistance

La cavité en dessous peut être fabriquées soit par gravure KOH et des etch-stop par bulk micromachining et des injections de bore ou bien par etch-stop via jonction p-n

On peut créer une cavité de pression constante isolée en collant un wafer en dessous de la cavité avec une composition vitrifiable

Une deuxième technique de création de cette cavité s'appelle APSM technology (Advanced Porous Silicon Membrane) : une gravure anodique plante une couche de Si poreux qui crée une cavité interne par agglomération en chauffant le wafer, le silicium est ensuite recristallisé par épitaxie