



Aperçu sur les salles blanches et les procédés technologiques Application au domaine médical



Lieu et date de la présentation

Université Abou Bakr Belkaïd Tlemcen

Faculté de Technologie

Département de Génie Biomédical

25 Avril 2018

Prof. Abdelhamid BENHAYA

Director of Advanced Electronics Laboratory

Head of Clean room

Department of Electronics

Faculty of Technology

University of Batna 2

Rue Chahid Boukhrouf Mohamed El Hadi

05000 Batna , Algeria

e-mail:

a.benhaya@univ-batna2.dz

benhaya_abdelhamid@yahoo.fr

Tel:+213 (0)7 73 87 37 84



Plan de l'exposé

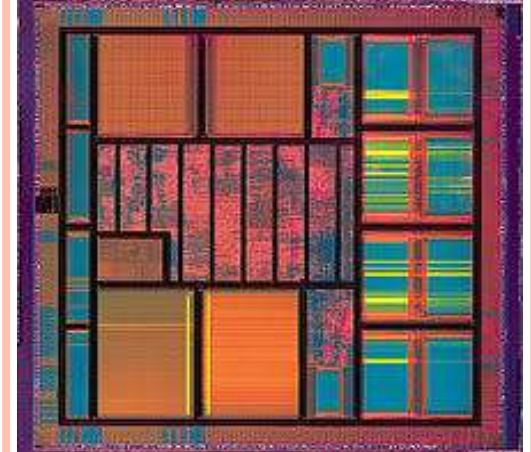
Aperçu sur les salles blanches

Procédés technologiques de base

- ❑ Procédures de nettoyage des substrats
- ❑ Techniques d'oxydation
- ❑ Photolithographie
- ❑ Gravure
- ❑ Techniques de réalisation des couches minces

Aperçu sur la technologie des MEMS

Application médicale (micropompe)



Aperçu sur les salles blanches



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

DÉFINITION

Définition simple

Une salle blanche (ou propre) est une salle qui est propre.

Définition selon la norme ISO 14644-1

Selon cette norme, la salle blanche est définie comme suit:

Une salle dans laquelle la concentration des particules en suspension dans l'air est maîtrisée et qui est construite et utilisée de façon à minimiser l'introduction, la production et la rétention des particules à l'intérieur de la pièce et dans laquelle d'autres paramètres pertinents, telles que la température, l'humidité et la pression sont maîtrisés comme il convient.



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

TERMINOLOGIE

Terminologie utilisée

La terminologie utilisée est extrêmement variée pour qualifier les zones à contamination maîtrisée :

- Salles blanches ou salles propres;
- Salles ou blocs stériles;
- Salles microbiologiquement maîtrisées (SMM);
- Salles grises;
- Doigts gris;
- Zones à contamination contrôlée (ZCC):
- Zones à atmosphère contrôlée (ZAC):
- Zones à environnement ou empoussièrement contrôlé (ZEC)...



APERÇU SUR LES SALLES BLANCHES

HISTORIQUE

Naissance des salles blanches

Les premiers environnements propres et contrôlés ont été construits pour les hôpitaux.

Des médecins et biologistes, comme **Pasteur**, **Lister**,... ont compris la nécessité de ces environnements pour lutter contre la contamination.

Lister aspergeait du phénol dans l'air autour du patient pour réduire le risque d'avoir des infections dues aux microorganismes qui existent dans l'air.

Avec cette technique ainsi que le nettoyage des instruments, le port de blouses, de masques et de gants, **Lister** a créé les premières salles blanches et des environnements contrôlés pour y opérer les patients



APERÇU SUR LES SALLES BLANCHES

HISTORIQUE

Besoins et progrès

Les 1^{ère} améliorations ont commencé avec l'arrivée de la **ventilation positive** (apport de l'air filtré et propre dans la zone contrôlée), qui a permis de mieux contrôler les conditions de l'environnement.

Le **besoin de développement technologique** durant la 2nd guerre mondiale a poussé celui de la technologie des salles blanches (réduction du taux de rebut dans les chaînes de fabrication des armes, des chars blindés et des parties critiques des avions).

Naissance des filtres HEPA (High Efficient Particulate Air)



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

HISTORIQUE

Besoins et progrès (**suite**)

1961: Exploitation de la technique du flux laminaire (**LAF=Laminar Air Flow**);

Actuellement, on utilise le terme de flux unidirectionnel ou UDF (**Uni Directional Flow**);

Remarque1

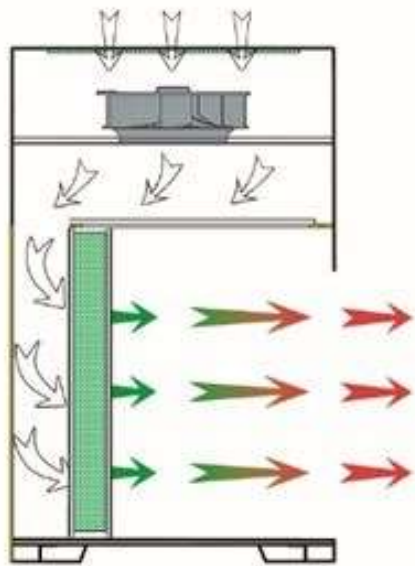
Le terme UDF décrit plus exactement **la trajectoire** de l'air dans l'environnement propre.

Cette trajectoire peut être:

- **Vertical** (entre au plafond et est récupéré au sol perforé);
- **Horizontal** (entre par un mur perforé et est récupéré par un autre mur perforé)

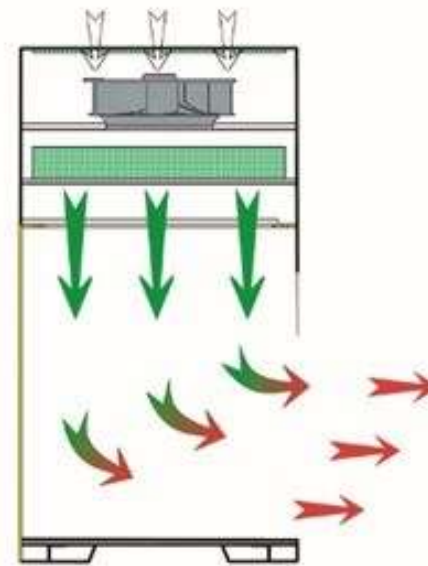


APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES HISTORIQUE



Horizontal Type

- Polluted Air
- HEPA Filtered Air
- Room Air



Vertical Type



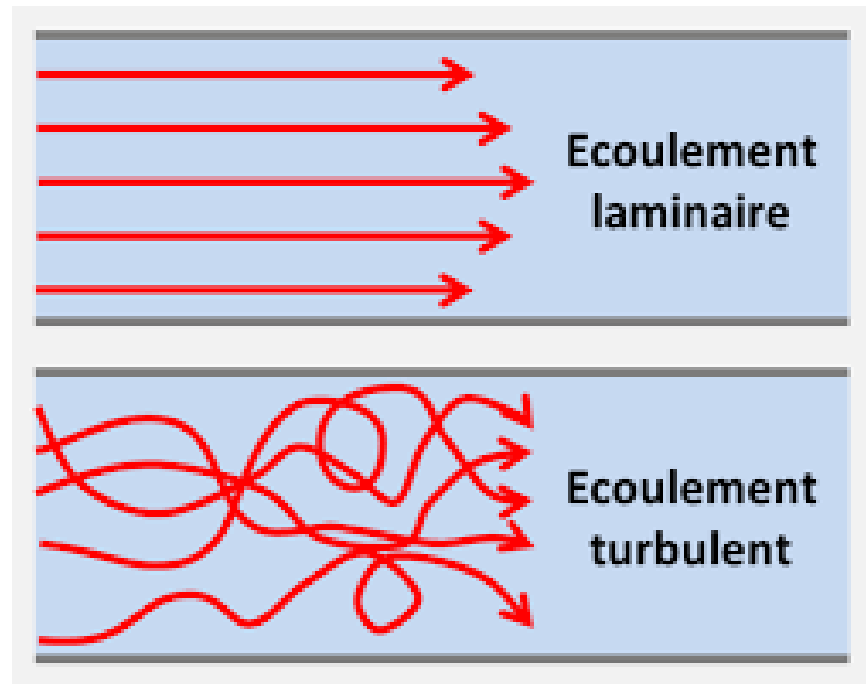
APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

HISTORIQUE

Besoins et progrès (suite)

Remarque 2

La technique UDF qui génère un flux uniforme (laminaire) est plus efficace, car elle permet l'expulsion des microparticules à l'extérieur de la zone contrôlée, alors que l'injection d'un flux aléatoire et turbulent, dilue seulement l'air existant avec de l'air propre.



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

NORMES

Normes et notion de classe

Idée de la classe selon la norme US 209

Pour pouvoir comparer la propreté des environnements contrôlés on a introduit, selon la norme **US Federal Standard 209**, la notion de classe qui établit une correspondance entre la classe de propreté et les concentrations de particules de différentes tailles allant de **0,1 μm** jusqu'à **10 μm** .

Définition de la classe

La classe de propreté est caractérisée par le nombre des particules de **0,5 μm de diamètre**, mesuré dans un **piéd cube** (28,3 dm³)



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

NORMES

Norme Internationale ISO 14644-1 (appliquée aux USA depuis 2001)

Cette norme a été introduite pour uniformiser les différentes normes nationales.

Dans cette norme, la définition de **la classe** se réfère au **logarithme** de la **concentration des particules** de **0,1 μm** par **m^3** .

Une classe **ISO 5**, correspond à une classe qui contient moins de **100.000 particules** de **0,1 μm** par **m^3** .

Une classe **ISO 5** correspond à une classe qui contient **moins** de **100.000 particules** de **0,1 μm** par **m^3** (**3520** particules de **0,5 μm** par **m^3** , soit **100** particules de **0,5 μm** par **pied³**).

Conséquence

ISO 5 correspond a la classe de propreté 100 suivant le **US Fderal Standard 209** .



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

NORMES

Correspondance entre la **US Federal Standard 209** et la norme **ISO 14644-1**

Type de classement		Concentration maximale admissible (nombre de particules par unité de volume)											
ISO	US 209	0,1 µm		0,2 µm		0,3 µm		0,5 µm		1 µm		5 µm	
		m ³	pied ³	m ³	pied ³	m ³	pied ³	m ³	pied ³	m ³	pied ³	m ³	pied ³
ISO1		10	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ISO2		100	-	24	-	10	-	4	-	-	-	-	-
ISO3	1	1.000	35	237	7,5	102	3	35	1	8	-	-	-
ISO4	10	10.000	350	2.370	75	1.020	30	352	10	83	-	-	-
ISO5	100	100.000	-	23.700	750	10.200	300	3.520	100	832	-	29	-
ISO6	1.000	1.000.000	-	237.000	-	102.000	-	35.200	1.000	8320	270	293	7
ISO7	10.000	-	-	-	-	-	-	352.000	10.000	83200	2750	2.930	70
ISO8	100.000	-	-	-	-	-	-	3.520.000	100.000	832000	27500	29.300	700



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

DIFFÉRENTS TYPES DE SALLE BLANCHE

Types de salles propres

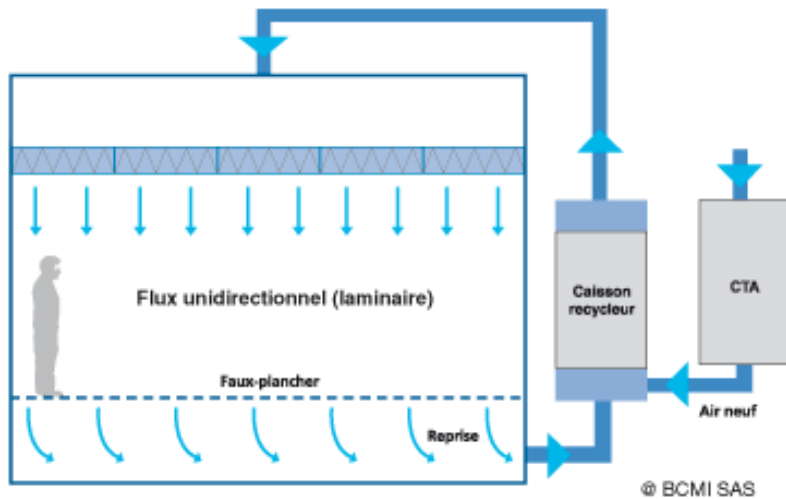
Les salles propres sont généralement :

- ❑ à flux turbulent
- ❑ à flux mixte **ou flux unidirectionnel partiel** (flux unidirectionnel installé au sein d'une zone à flux turbulent)
- ❑ à flux unidirectionnel total
- ❑ à flux turbulent ou unidirectionnel avec systèmes de confinement spécifiques (isolateurs, mini-environnements...).

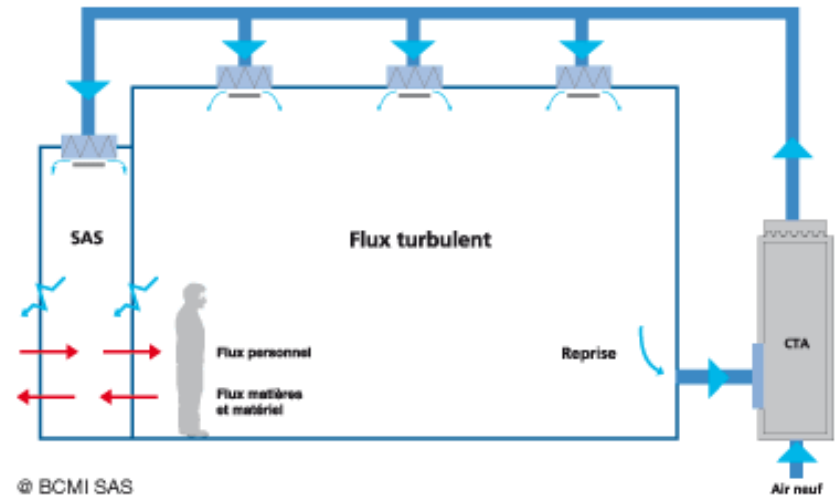


APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

DIFFÉRENTS TYPES DE SALLE BLANCHE



Salle propre à flux unidirectionnel
(type de flux adapté aux classes ISO 5
et inférieures)



Salle propre à flux turbulent (type de
flux adapté aux classes ISO 6 à ISO 9)



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

STRUCTURE D'UNE SALLE BLANCHE (INDUSTRIE)

Partie supérieure :

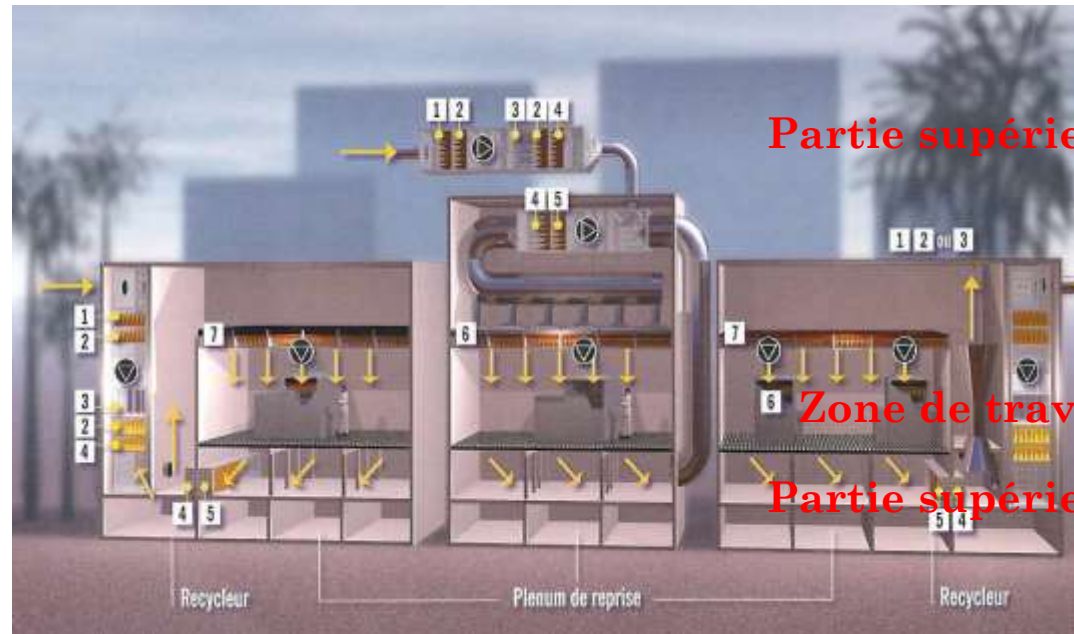
C'est la partie où l'air est filtré avant d'être envoyé dans la salle blanche.

Son passage par les filtres ainsi que par les diffuseur Permet de former un flux laminaire et homogène.

Zone de travail

C'est le volume dans lequel l'air, après avoir été filtré, circule en flux laminaire.

Partie inférieure : Dans cette partie l'air, après avoir traversé la zone de travail, est récupéré et mélangé avec de l'air provenant de l'extérieur, puis dirigé vers la partie supérieure pour recommencer son cycle.



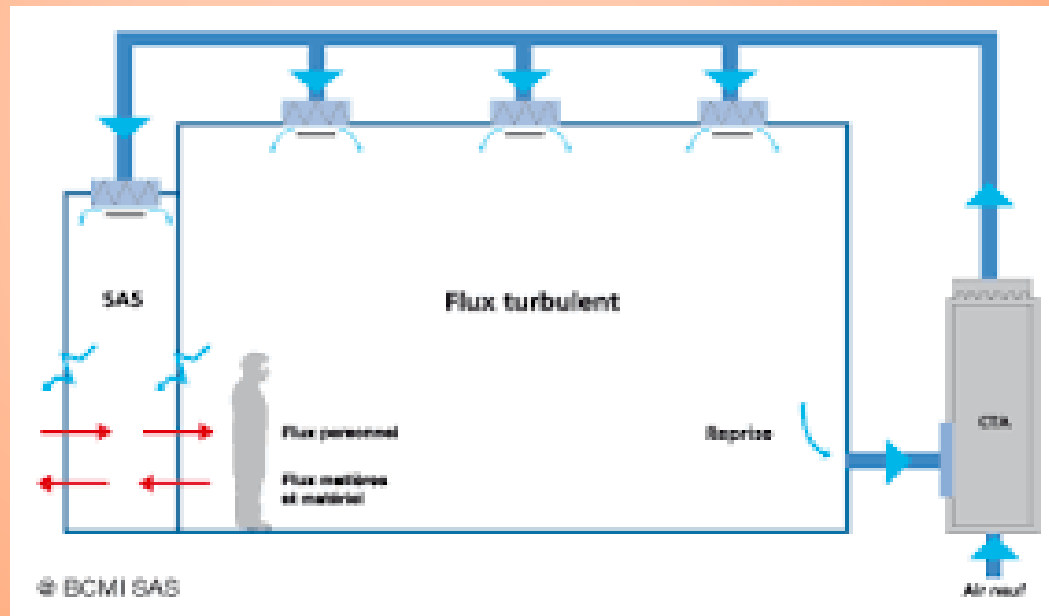
APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

RÉGÉNÉRATION DE L'AIR

Importance de la régénération de l'air

En général 10 - 20 % du volume de l'air est **remplacé** par de l'**air nouveau** pour garantir la quantité d'oxygène indispensable pour le personnel.

En plus, cela permet d'éliminer les gaz qui peuvent être produits lors des différents procédés dans la salle blanche et le CO₂ des expirations.



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

RÔLE DE LA VITESSE ET DU TAUX DE BRASSAGE

Facteurs influant sur la propreté d'une salle blanche

Les deux facteurs, qui caractérisent l'écoulement de l'air injecté dans une salle blanche et qui sont fonction de la classe de propreté recherchée, sont **la vitesse de l'air** et **le taux de brassage** (taux de renouvellement de l'air de la salle), c'est-à-dire **le nombre de renouvellement** du volume de l'air **par heure**.

Exemple

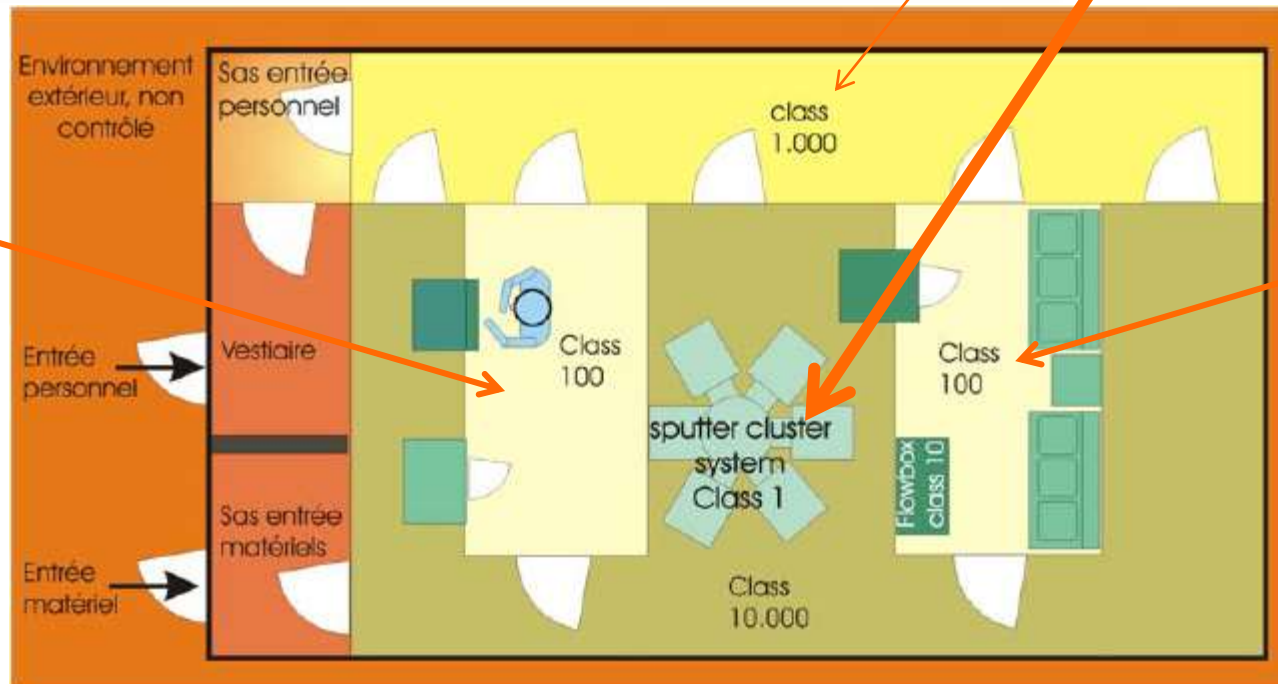
Dans une salle blanche de classe **ISO 5** (**classe 100** en US Federal Standard, 209E), **la vitesse** est située entre **0,3 et 0,6 m/s** et le **taux de brassage** (renouvellement) entre **300 et 600**.



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

EXIGENCES DE LA PROPRETÉ FACE À L'ASPECT ÉCONOMIQUE

Question: Est-il nécessaire d'avoir la même classe partout dans une salle blanche?



Réponse: Non, il suffit d'établir un environnement propre uniquement autour du procédé qui a besoin d'être protégé



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

AVANT DE RÉALISER UNE SALLE BLANCHE

Étapes à suivre

- ❑ Préciser l'activité:

Production, Recherche, Soins...

- ❑ Préciser les objectifs à atteindre (par rapport au produit, à l'opérateur, à l'environnement...)
- ❑ Déterminer les moyens à mettre en œuvre en fonction notamment des différentes contraintes
- ❑ Prise en compte de l'ensemble des facteurs pouvant intervenir directement ou indirectement dans les processus de contamination.



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

CONTAMINANTS

- Les éléments indésirables, responsables de contaminations, comprennent :
 - Des **microorganismes** vivants ou revivifiables
 - Des poussières ou **particules** inertes
 - Des contaminants chimiquement actifs :
contamination **chimique** sous forme gazeuse, liquide ou solide, ou contamination **moléculaire**



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

SOURCES DE CONTAMINATION

- On distingue, en général, 5 grands types de source de contamination (**règle des 5 M**) :
 - La main-d'oeuvre (personnel)
 - Le milieu (environnement : air ambiant, surface)
 - Les matières (matières premières, fluides process, etc.)
 - Le matériel (équipement de production, de contrôle, de nettoyage, de maintenance, de sécurité, de transfert, d'exploitation, etc.)
 - Les méthodes (production, maintenance, nettoyage, contrôle, transfert, etc.)



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

LES BONNES HABITUDES



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

NETTOYAGE RÉGULIER DE LA SALLE ET DES ÉQUIPEMENTS



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

IDÉE DU COÛT (À L'ÉTRANGER)

COÛT DE LA SALLE BLANCHE

➤ Coût initial d'équipement de la salle blanche

Classe de propreté	prix au m ² (€)
10	10 à 16 000
100	6 à 10 000
1000	4 à 8 000
10000	3 à 6 000
100000	2 à 2 500



Salle blanche de classe ISO 5 de 60 m²
350 000 euros (pour un travail optimal à
4 personnes max)



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

IDÉE DU COÛT (À L'ÉTRANGER)

Equipements pour les procédés technologiques

- Stations chimiques (nettoyage, photolithographie, gravure);
- Aligneur de masques (double face pour MEMS);
- Masqueur (écriture des masques)
- Microscope métallographique;
- Evaporateur (thermique ou à canons à électrons);
- Four pour l'oxydation et la diffusion;
- Machines pour la gravure sèche (MEMS);
- Profilomètre, et station des quatre pointes;
- Wafer et wire bonder



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

IDÉE DU COÛT (À L'ÉTRANGER)

Frais de fonctionnement: Consommables

- **Filtres absolus (1700 euros par an sur 4 ans pour 60 m²)**
- **Équipement de protection individuel (combinaisons, gants...)**
- **Papiers d'essuyage**
- **Réactifs et production d'eau Ultra pure**
- **Papier et stylo de salle blanche**



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

GESTION ET EXPLOITATION D'UNE SALLE BLANCHE

Maintien de la qualité de la salle blanche

- Mettre en place des procédures de décontamination de la salle blanche avec mesure régulière du taux de particules.
- Veiller à ce que la décontamination de la salle soit faite de manière régulière.
- Adapter le choix des consommables à la classe de la zone de travail et au types de manipulation.
- Mettre en place des procédure de manipulation pour éviter les perturbations de flux (mouvements de l'opérateur inadapté) et le contaminations chimiques (les produits concentrés ne peuvent rentrer qu'en prenant d'extrêmes précautions)



APERÇU SUR LES SALLE BLANCHES

GESTION ET EXPLOITATION D'UNE SALLE BLANCHE

Comment garantir le bon fonctionnement d'une salle blanche?

Une personne compétente doit :

➤ **Avoir la responsabilité du suivi de la qualité de la zone de travail et des équipements qu'elle contient.**

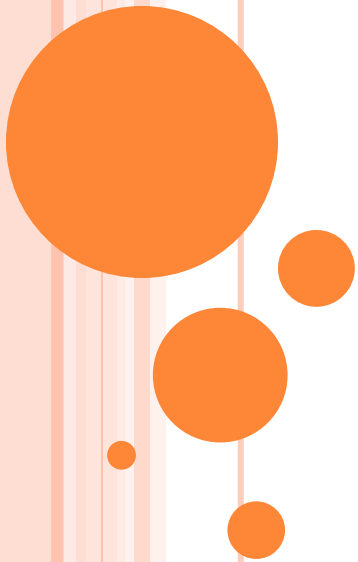
- **Contrôler qualité des zones à environnement contrôlé**
- **Décider de la périodicité de la décontamination**

➤ **Veiller au bonnes pratiques de manipulations (Utiliser le bon produit pour la bonne application)**

➤ **Gérer la mise au point des nouveaux protocoles de manipulation (nouveaux échantillon ou nouvelle opération)**

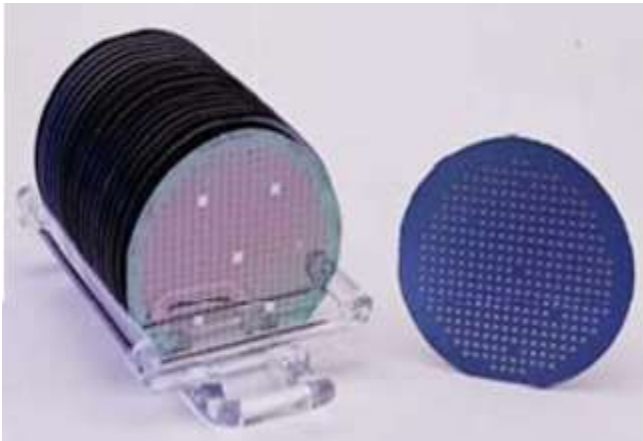


Procédés technologiques de base



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PROCÉDURES DE NETTOYAGE DES SUBSTRATS



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PROCÉDURES DE NETTOYAGE DES SUBSTRATS

Exigences d'un procédé

Il existe plusieurs procédures de nettoyage.

Selon **le niveau de propreté requis**, on effectue une ou plusieurs des procédures de nettoyages suivantes dans l'ordre.

- ❑ Nettoyage à l'eau désionisée;
- ❑ Nettoyage initial aux solvants;
- ❑ Solution Piranha pour silicium et photomasques;
- ❑ Désoxydation du silicium;
- ❑ Nettoyages RCA ou Standard Clean pour le silicium;
- ❑ Nettoyage plasma.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PROCÉDURES DE NETTOYAGE DES SUBSTRATS

Nettoyage à l'eau désionisée

Pour retirer les résidus de coupe ou de clive, ou toute particule libre de la surface, on procède comme suit:

- ❑ Eau désionisée par jet, cascade, ou immersion avec agitation;
- ❑ Séchage par jet d'azote;
- ❑ Inspection afin de vérifier l'absence de particule sur la surface;



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PROCÉDURES DE NETTOYAGE DES SUBSTRATS

Nettoyage initial aux solvants

- ❑ Acétone : Immersion 5 minutes
- ❑ Alcool tel que méthanol ou isopropanol (2-propanol ou IPA) : immersion 5 minutes
- ❑ Rinçage à l'eau désionisée, requis si on poursuit le nettoyage
- ❑ Séchage à l'azote (non-requis si on poursuit le nettoyage)

Remarque:

Immersion du contenant (bécher) dans un bain ultrasonique augmente l'efficacité du nettoyage de l'échantillon qu'il contient, mais il ya risque de clivage involontaire de l'échantillon, notamment pour les échantillons plus fragiles.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PROCÉDURES DE NETTOYAGE DES SUBSTRATS

Solution Piranha pour silicium et photomasques

La solution Piranha est un mélange à base de H_2SO_4 - H_2O_2 ;

La préparation de la solution piranha est dangereuse, car la réaction est exothermique et dégage des vapeurs.

Commencer par verser l'acide dans le peroxyde, mais jamais le contraire pour éviter projection de l'acide.

La procédure est la suivante:

- H_2SO_4 : H_2O_2 (1 : 1) par Immersion pendant 15 mn;
- Rinçage à l'eau désionisée dans une cascade pendant 3 mn;
- Séchage au jet d'azote (non-requis si on poursuit le nettoyage).



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PROCÉDURES DE NETTOYAGE DES SUBSTRATS

Désoxydation du silicium

HF est un acide très dangereux à manipuler.

Opérer avec une grande vigilance et une protection complète.

La procédure est la suivante:

- ❑ HF:H₂O dilué 1:10 voire 1:50 si c'est trop concentré, avec immersion pendant 10 à 15 s;
- ❑ Rinçage à l'eau désionisée par cascade 3 min;
- ❑ Séchage au jet d'azote (non-requis si on poursuit le nettoyage).



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PROCÉDURES DE NETTOYAGE DES SUBSTRATS

Nettoyages RCA ou Standard Clean pour silicium

Ce procédé se compose de deux sous procédés SC-1 (standard clean 1) et SC-2 (standard clean 2) séparées par une étape de désoxydation par HF.

- ❑ **SC-1 Organic Clean:** Avec la solution $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_4\text{OH}$ (5:1:1) à 80°C, 10 mn
- ❑ **Désoxydation HF:H₂O** dilué 1:10 voire 1:50 si c'est trop concentré, avec immersion 10 à 15 s;
- ❑ **SC-2 Ionic clean** avec la solution $\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl}$ (6:1:1) à 80°C, 10 mn;
- ❑ **Désoxydation HF:H₂O** dilué 1:10 voire 1:50 si c'est trop concentré, avec immersion 10 à 15 s.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PROCÉDURES DE NETTOYAGE DES SUBSTRATS

Nettoyage plasma

Après les nettoyages conventionnels, mécaniques et chimiques avec des agents de nettoyage liquides, des résidus organiques persistent en surface du substrat.

On utilise les plasmas suivants:

- ❑ Plasma d'oxygène ou d'air sec;
- ❑ Plasma d'hydrogène;
- ❑ Plasma d'argon.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

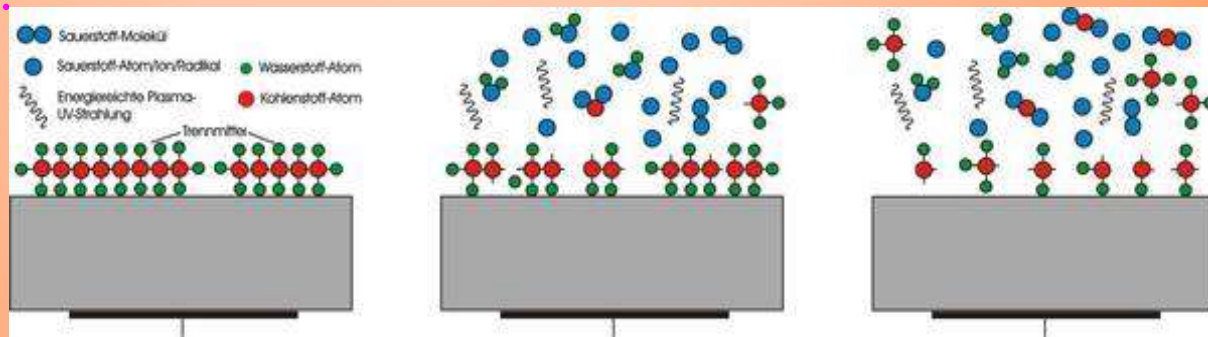
PARTIE : PROCÉDURES DE NETTOYAGE DES SUBSTRATS

Principe du plasma oxygène

Le rayonnement UV du plasma craque les chaînes des polymères hydrocarbonés .

Les espèces radicalaires formées à partir de l'oxygène se lient rapidement aux extrémités libres des chaînes sectionnées pour empêcher toute recombinaison.

Ce processus entraîne la fragmentation des macromolécules en plus petites molécules passant alors à l'état gazeux et pouvant ainsi être éliminées par le flux gazeux créé par la pompe à vide.

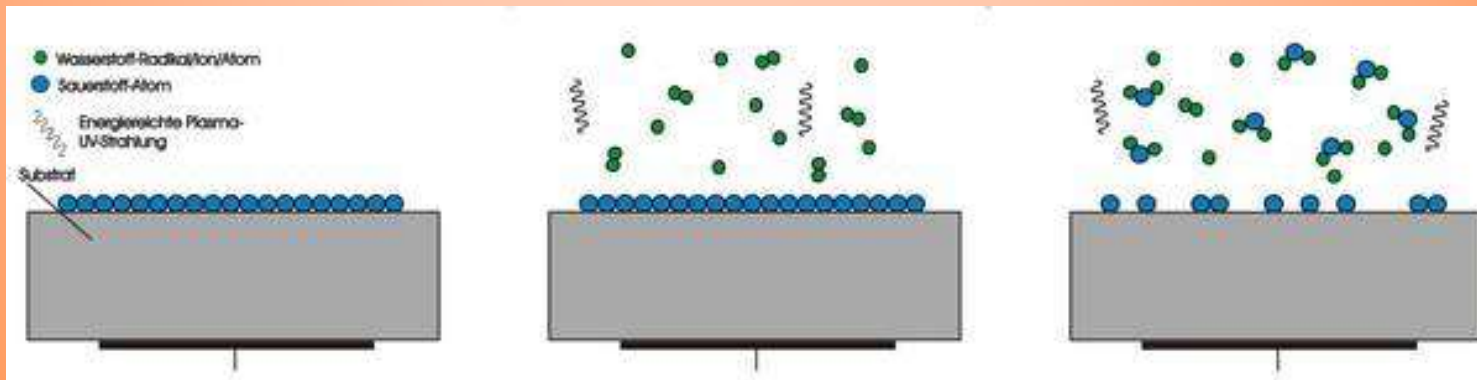


PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PROCÉDURES DE NETTOYAGE DES SUBSTRATS

Principe du plasma d'hydrogène

Un plasma hydrogène produit des espèces excitées, radicalaires et des ions hydrogène fortement réactives qui vont se lier à l'oxygène, réduire les oxydes et former des molécules d'eau qui seront éliminées par le flux créer par la pompe à vide.

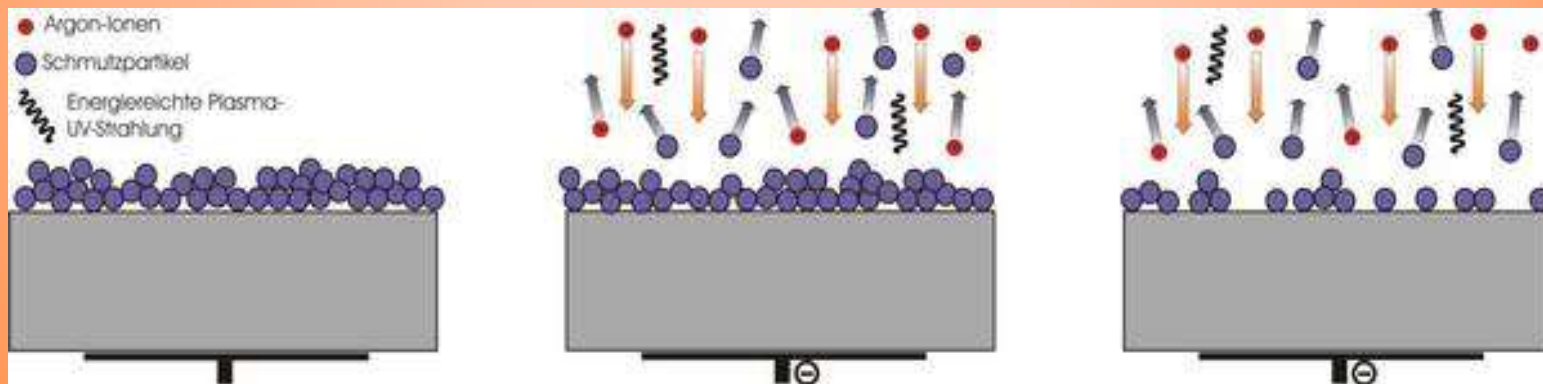


PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PROCÉDURES DE NETTOYAGE DES SUBSTRATS

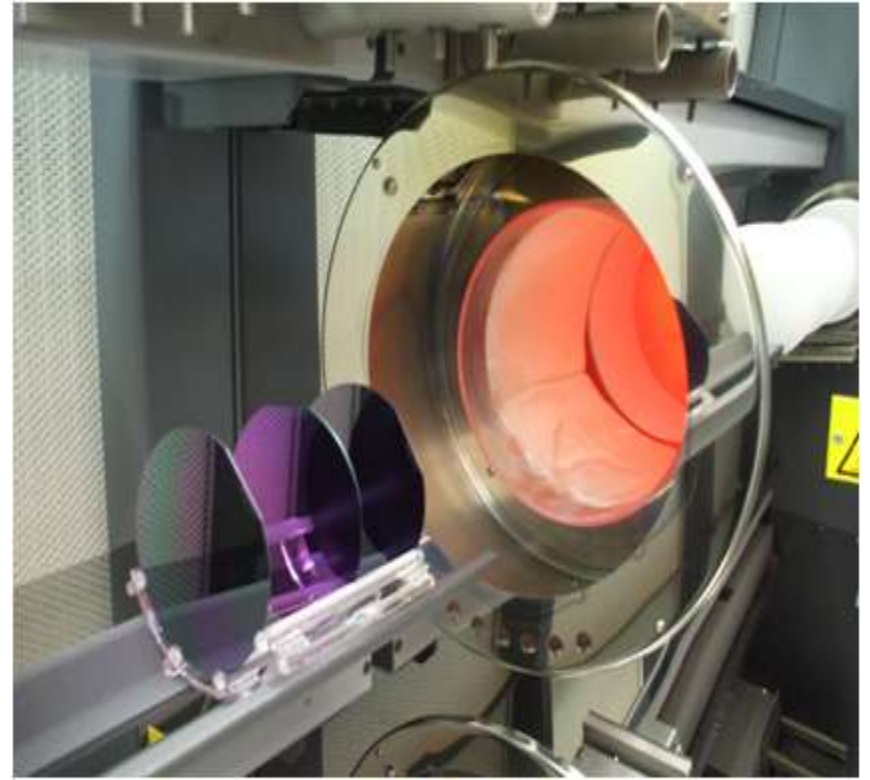
Principe du plasma d'argon

Par l'impact mécanique des ions d'un gaz inerte come l'argon, accélérés par un champ électrique, les polluants gênants de la surface du substrat peuvent être éliminés.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : TECHNIQUES D'OXYDATION



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : TECHNIQUES D'OXYDATION

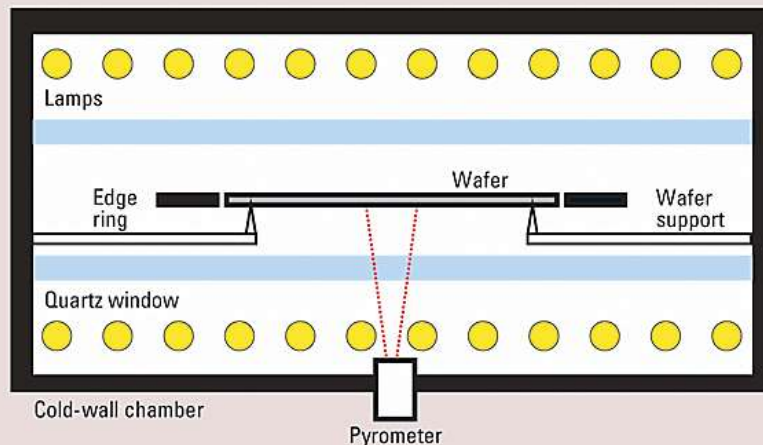
Oxydation thermique

L'oxyde thermique est normalement effectuée dans un four de diffusion (vertical ou horizontal)

Il peut également être effectué dans un four thermique rapide (RTP) 1 à 2 min (rampe de 20-250°C/sec, 200-1300°C)

Les systèmes RTP sont normalement utilisés pour les oxydes thermiques minces et secs.

RTP SYSTEM CONFIGURATION



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : TECHNIQUES D'OXYDATION

Techniques de croissance

Il existe deux techniques d'oxydation: Humide et sèche

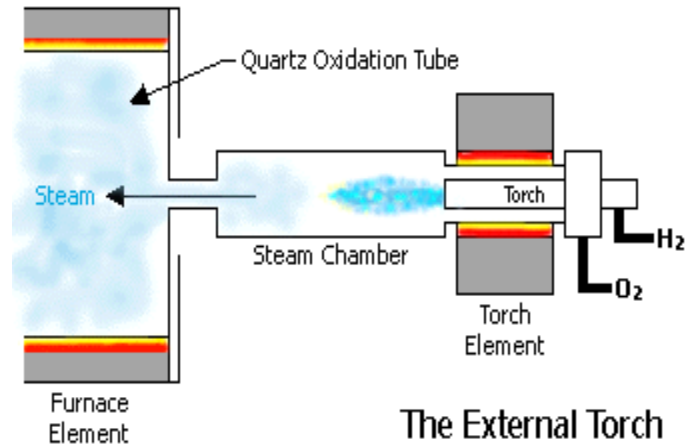
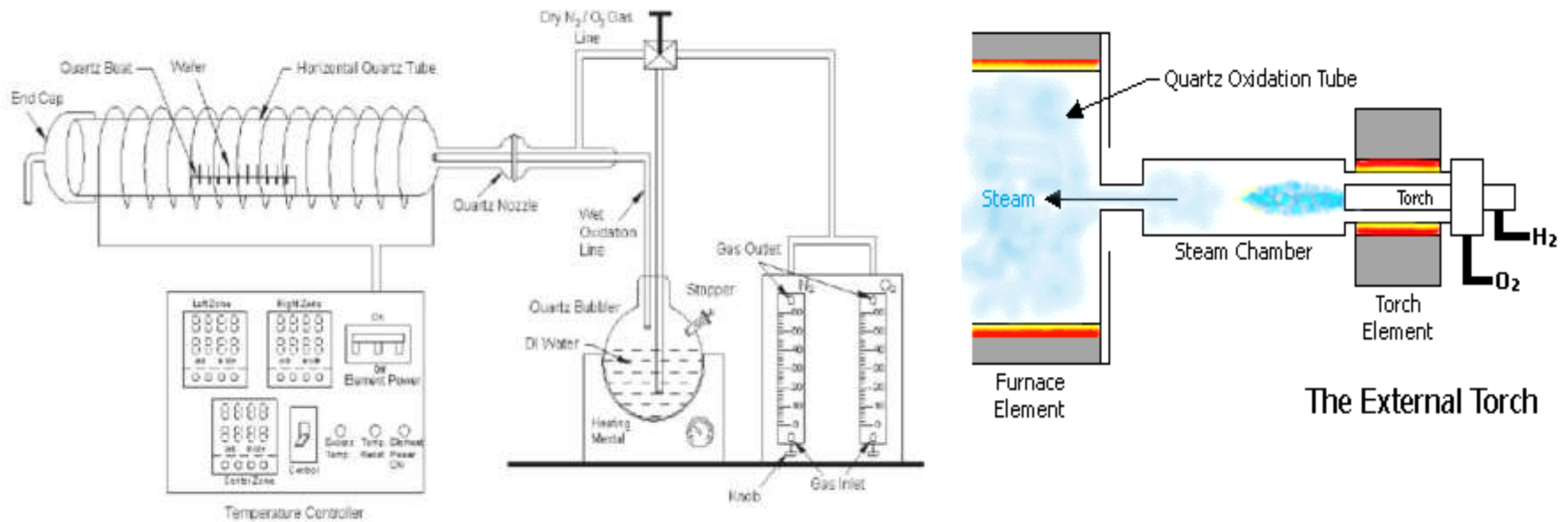
Oxyde thermique humide

La croissance de l'oxyde thermique à l'aide de la vapeur d'eau utilisée pour produire un oxyde plus épais de 2 000 - 25 000 Å, cet oxyde épais est généralement appelé oxyde de champ (**Field oxide**) utilisé comme masque, dans l'enrobage ou dans les application où une forte rigidité électrique est exigée.



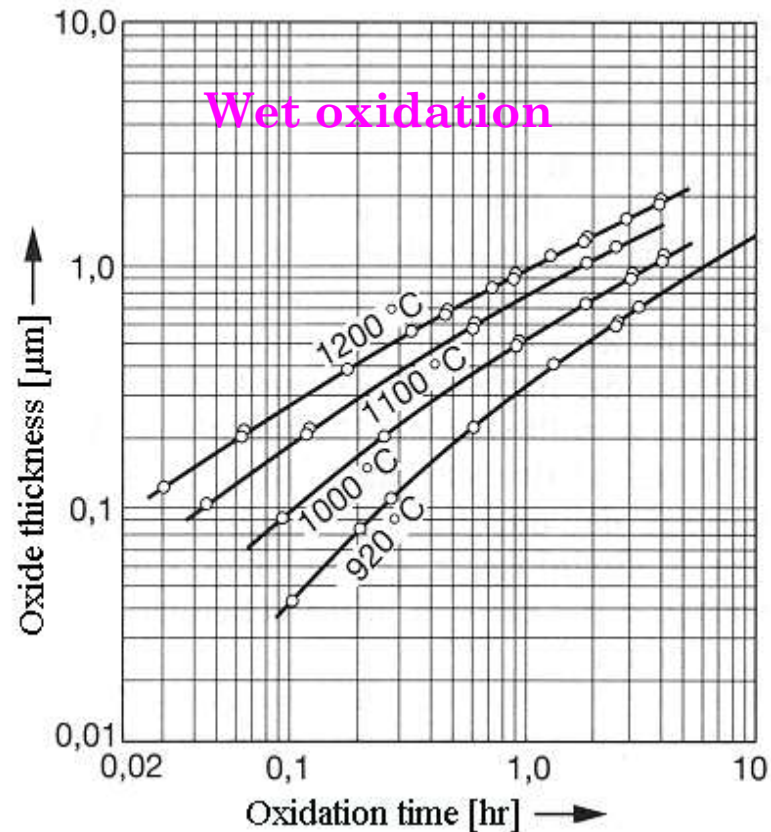
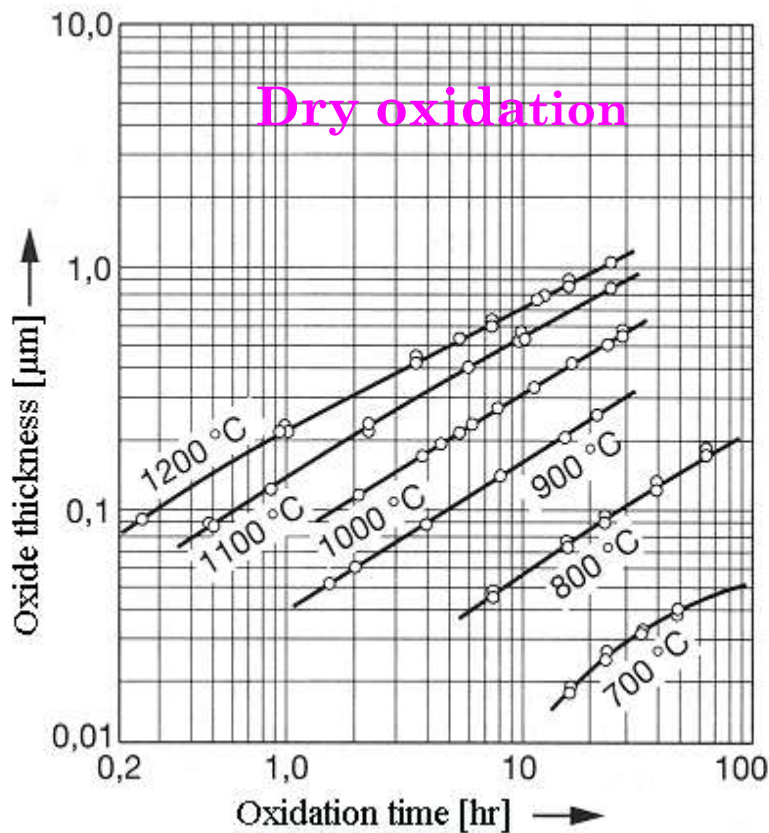
PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : TECHNIQUES D'OXYDATION



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : TECHNIQUES D'OXYDATION



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : TECHNIQUES D'OXYDATION

Oxyde thermique sec

Il est obtenu de la même manière que l'oxyde thermique humide, sauf qu'au lieu de la vapeur d'eau comme gaz d'oxydation, seul l'oxygène pur est utilisé.

Une oxydation sèche produit un oxyde thermique plus uniforme et plus dense avec une résistance diélectrique encore plus élevée que l'oxyde humide.

La principale différence dans la croissance de l'oxyde humide et sec est le taux de croissance: l'oxyde sec se développe beaucoup plus lentement que l'oxyde humide. Pour cette raison, les oxydes secs ne dépassent normalement pas 1000 Å d'épaisseur et sont principalement utilisés pour les oxydes de grille et de condensateur minces où une grande uniformité et une forte rigidité diélectrique sont nécessaires.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Définition

La photolithographie est l'ensemble des opérations permettant de transférer une image, généralement présente sur un masque, vers un substrat.

Elle vient du mot **lithographie** (du grec *lithos*, « pierre » et *graphein*, « écrire »)

Méthode de transfert

Les motifs à transférer sont réalisés par étalement d'une couche à base d'une **résine photosensible** sur un substrat .

Ensuite, la couche photosensible est soumise à **l'insolation** qui consiste en **l'exposition de certaines zones** de la résine, par le biais d'un système de masquage, à un rayonnement ultraviolet.

Il se crée alors, par réaction photochimique, une image latente dans l'épaisseur de la résine photosensible.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Domaine d'utilisation

Cette technique est très utilisée dans l'industrie des semi-conducteurs où les motifs de l'image ainsi transférée deviendront, par la suite, les différentes zones des composants électroniques (exemple : contact, drain, source, émetteur, base, collecteur,...) ou les interconnexions entre ces composants.

Remarque:

Dans certains procédés, comme l'implantation d'ions, la résine photosensible sert de masque pour couvrir certaines zones qui ne doivent pas être dopées. Dans ce cas, il n'y a pas de transfert de motifs de la couche de résine photosensible dans la couche sous-jacente.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Étapes de la photolithographie

La photolithographie se compose des étapes suivantes:

- Ajout d'adhésifs et éliminer l'humidité de la surface du substrat;
- Étalement de la résine photosensible sur le substrat;
- Stabilisation de la couche de la résine photosensible;
- Exposition;
- Développement de la résine photosensible;
- Durcissement de la résine photosensible;
- Inspection.

PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

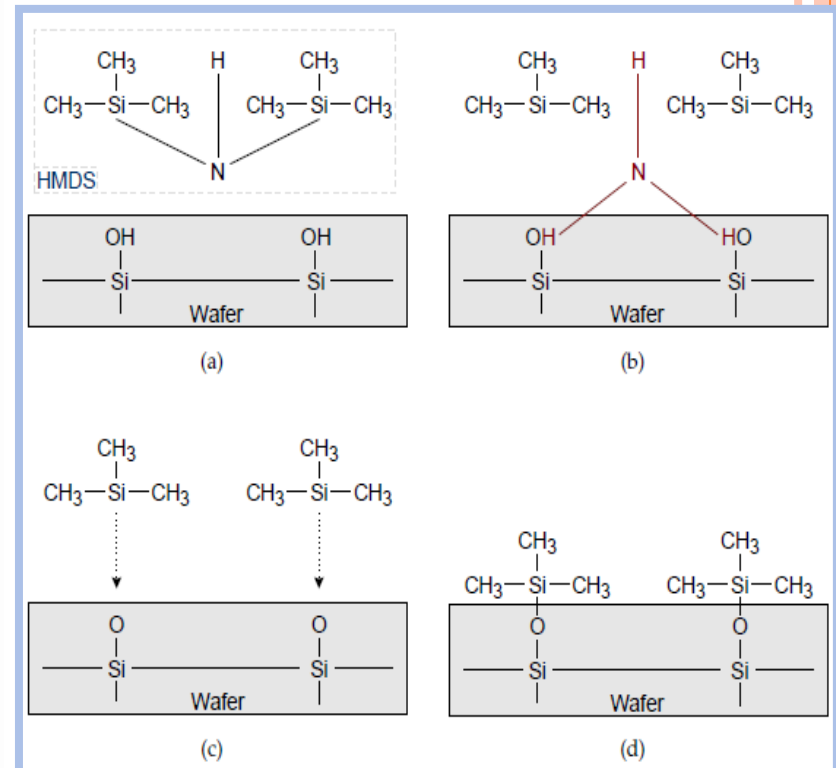
PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Ajout d'adhésifs

A cause de l'humidité dans l'atmosphère, il existe même après la pré-cuisson des groupes de l'atome d'hydrogène H ou hydroxyle OH⁻ fixés à la surface.

L'ajout de la HMDS qui se décompose en groupes Si-3CH₃ arrive à supprimer l'hydrogène en formant de l'ammoniac NH₃, ce qui rend la surface du substrat hydrophobe (n'attire pas l'eau).

N.B.:
HMDS=Hexamethyldisilazane



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Méthodes d'étalement de la photoresist

Il y a quatre méthode d'étalement ou de revêtement à savoir:

- **Spin Coating (plus utilisé);**
- **Spray Coating;**
- **Dip Coating;**
- **Roller Coating.**



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Spin coating (revêtement centrifuge)

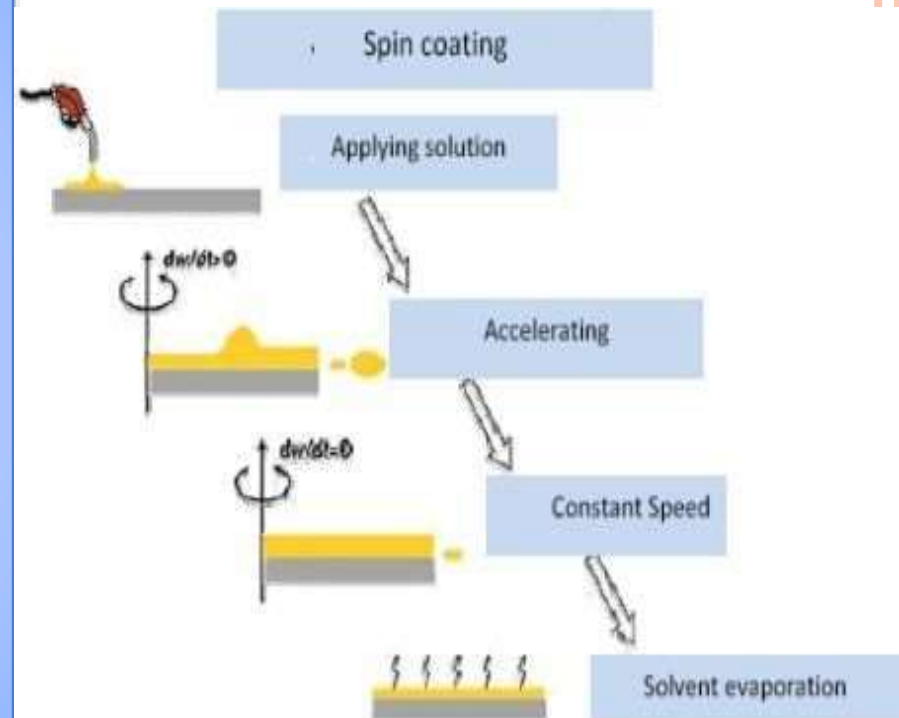
Avantages

La haute homogénéité de l'épaisseur du film ainsi que les temps de revêtement courts font du spin coating la technique de revêtement la plus appliquée en microélectronique.

Inconvénients

En cas de substrats en rotation non-symétrique, il y a formation de bosses près des bords du substrat à cause des fortes turbulences de l'air.

Pour le substrat texturé, la couverture des textures de bord est assez faible,



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Spray coating (revêtement par pluvérisation)

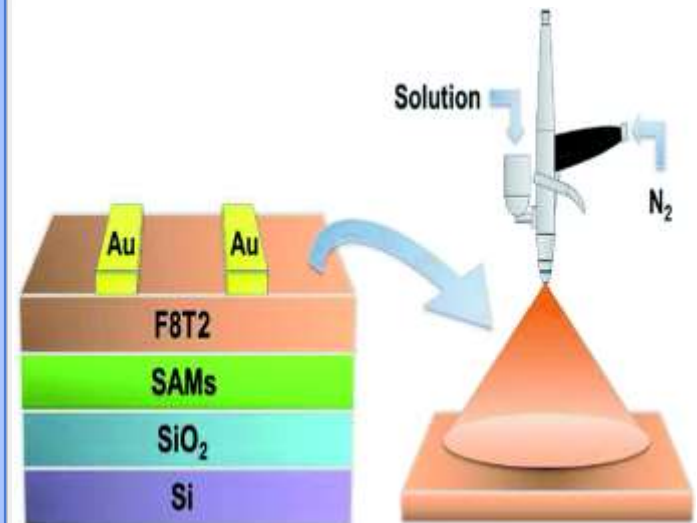
Un solvant riche en photoresist est pulvérisé en gouttelettes d'une taille micrométrique sous une pression de N₂ via une buse ou atomisation à ultrasons. Pour une bonne homogénéité de l'épaisseur du film, la buse et le substrat se déplacent latéralement l'un contre l'autre.

Avantages:

La technique **fonctionne avec tous les substrats** de taille et de forme arbitraires même en trois dimensions.

Dans des conditions optimisées, une **bonne couverture des bords** peut être atteinte.

Théoriquement, le gain en photoresist est plus élevé que pour le revêtement par centrifugation. Toutefois, en application, **seulement quelques % de la photoresist pulvérisée arrive à atteindre le substrat** et former le film sur le substrat



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Dip coating

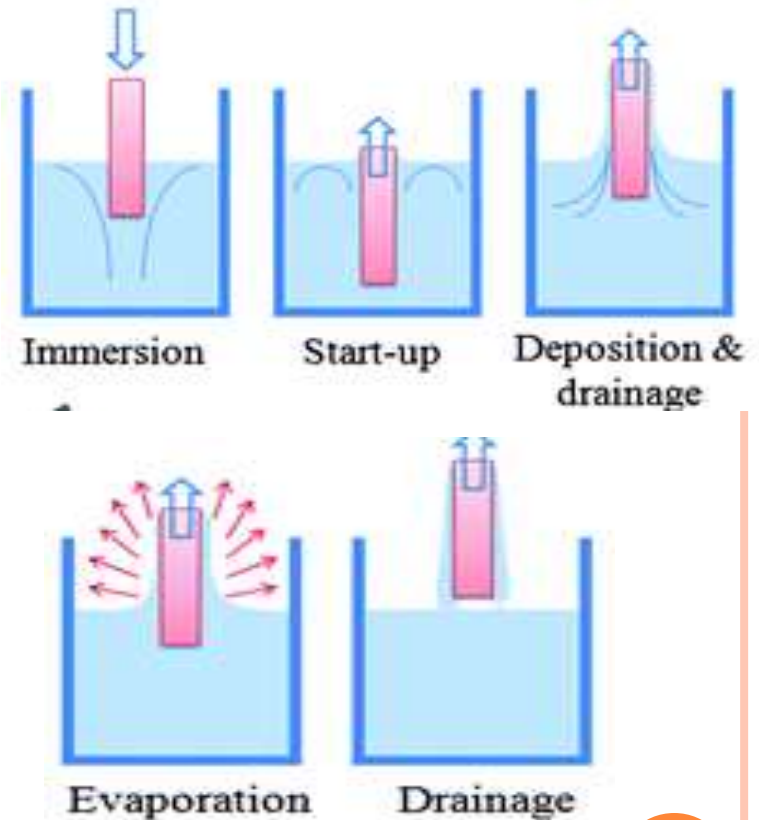
Un substrat est retiré d'une cuvette remplie de photoresist à une vitesse bien définie, généralement de 3 à 20 mm / s.

Plus la vitesse est faible , plus le film est mince

Avantages: Même des **substrats à grande échelle** et de **forme quelconque** peuvent être traités et la couche obtenue est lisse.

Inconvénients: Un **volume assez grand de la photoresist** est nécessaire pour remplir la cuvette.

L'épaisseur du film peut varier le long du substrat.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

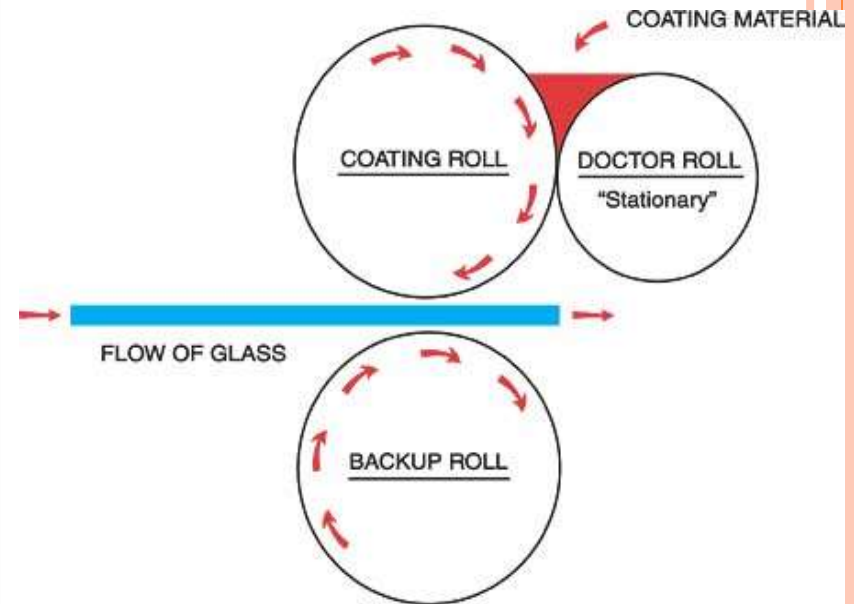
Coating Roller (revêtement au rouleau)

Dans cette technique, un rouleau à base de polymère transfère la photoresist au substrat.

Avantages: Le gain en photoresist avoisine les 100%, ce qui fait du coating roller une technique de revêtement à très faible consommation de photoresist.

Inconvénient: Pour obtenir des films lisses à l'aide de cette technique, on doit utiliser une photoresist aux propriétés spéciales.

Toutefois, si les exigences sur l'homogénéité de revêtement ne sont pas trop compromises, de bons résultats peuvent être atteints avec presque toutes les photoresists avec une viscosité ajustée.



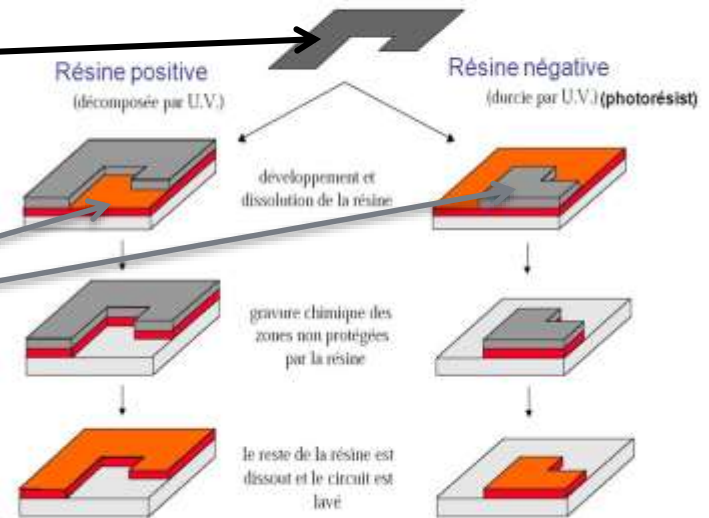
PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Exposition

Dans un outil d'exposition lithographique, il y a un **masque de verre** qui est partiellement recouvert de chrome pour une **exposition partielle** de la résine photosensible

Principe : utiliser un **masque**, une **résine** (pos. ou neg.), une **illumination**



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

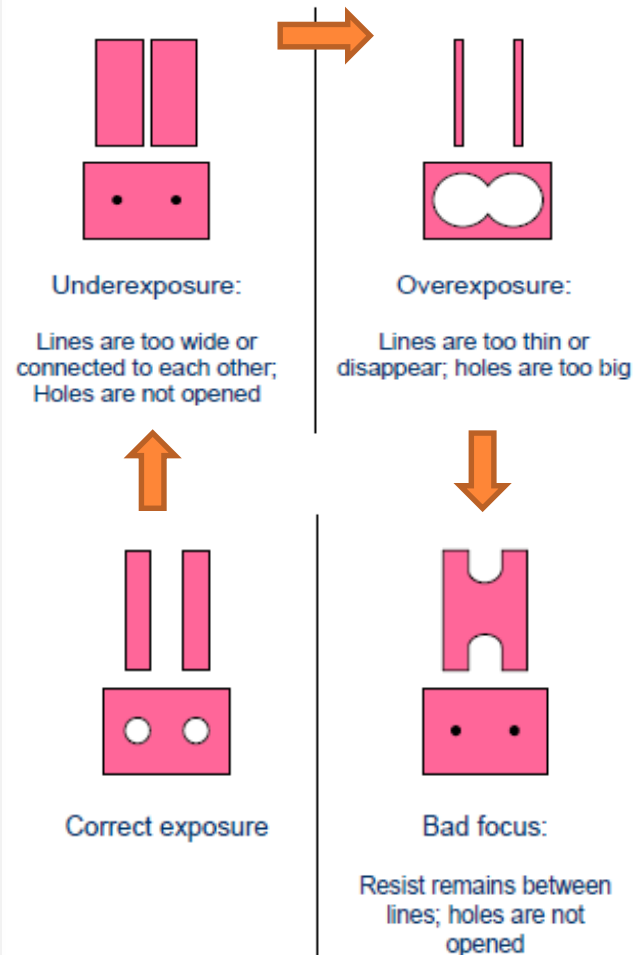
Problèmes d'exposition

La valeur du **temps d'exposition** est un **paramètre très important** pour atteindre les dimensions correctes des structures.

Plus les plaquettes sont exposées à la radiation, plus la surface est irradiée.

Remarque

En raison des fluctuations de la température ambiante, **une détermination précise de la durée d'exposition correcte doit être étudiée** avec un ou plusieurs tranches témoins, en raison des caractéristiques de la photoresist qui peuvent changer avec la température



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Sources de rayonnement

En fonction des exigences, la lithographie utilise différentes sources de rayonnement, à savoir:

- Rayonnement ultraviolet (200 – 400 nm);
- Rayons X (0.2-0.4 nm);
- Faisceau d'électrons (≈ 0.02 nm);
- Faisceau d'ions (pour protons H, 0.0001 nm).

Remarque:

Plus la longueur d'onde est courte, plus il est possible de réaliser de petites structures.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Méthodes d'exposition

Il existe 6 méthodes d'exposition, à savoir:

- Exposition par contact;
- Exposition de proximité;
- Exposition par projection;
- Exposition électronique;
- Exposition aux RX;
- Exposition à un faisceau d'ions.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

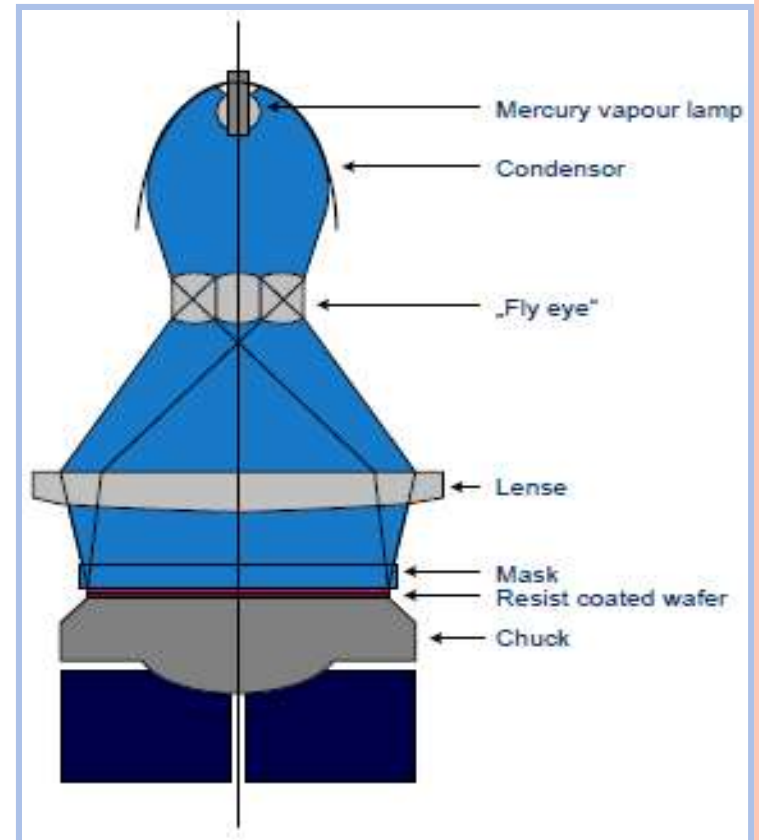
PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Exposition par contact

Le **masque** est en contact direct avec **la couche de la photoresist**, les structures sont transférées dans une échelle de 1: 1. Ainsi, les effets de dispersion ou de diffraction apparaissent uniquement sur les bords de la structure.

Cette méthode permet d'atteindre des longueurs caractéristiques de tailles modérés.

Les inconvénients sont évidents: **le masque est contaminé** en raison de son contact avec la résine **et peut être rayée** ainsi que la couche de la résine peut être endommagée.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

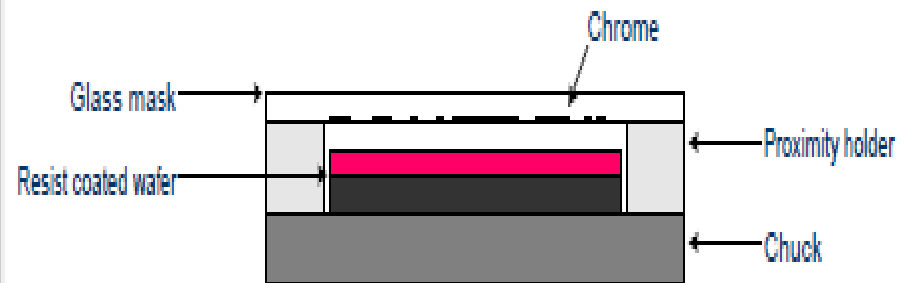
PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Exposition de proximité

Dans l'exposition de proximité, il n'y a pas de contact direct entre le masque et la résine.

Ainsi, seule une image d'ombre est projetée sur la plaquette qui se traduit par une résolution beaucoup plus mauvaise des structures.

Les problèmes de contact sont donc évités.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

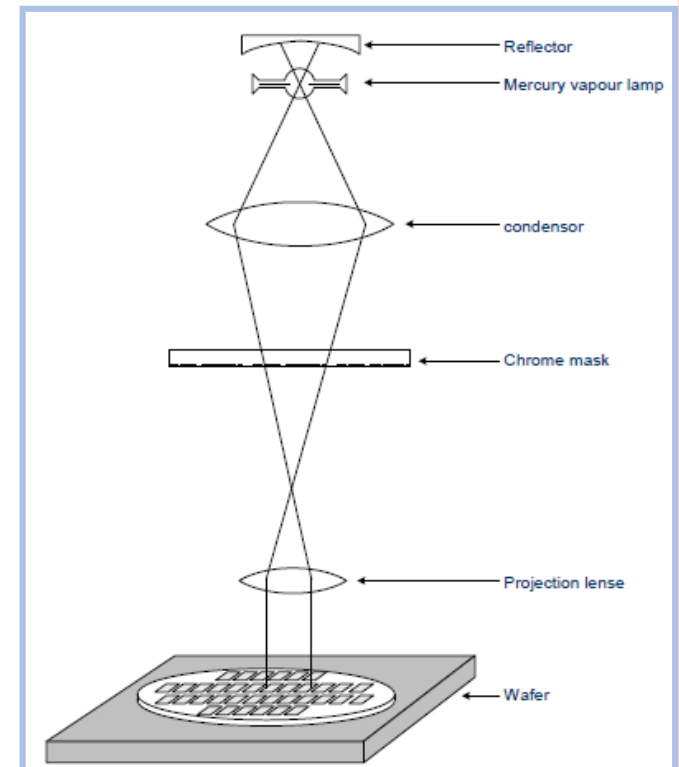
Exposition par Projection

L'exposition par projection utilise la technique dite de « **Step and repeat** ». Ainsi, seulement une ou quelques matrices (**rectangles**) sont projetés sur le substrat à la fois. L'ensemble plaquette est exposée pas par pas – matrice par matrice.

L'avantage de cette méthode est **que les structures sur le réticule sont agrandies 4 fois ou 10 fois**.

Si les structures sont projetées sur la plaquette à l'échelle réduite, **les défauts, comme des particules, sont aussi réduits**.

Contrairement à d'autres méthodes d'exposition, **la résolution est améliorée**.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

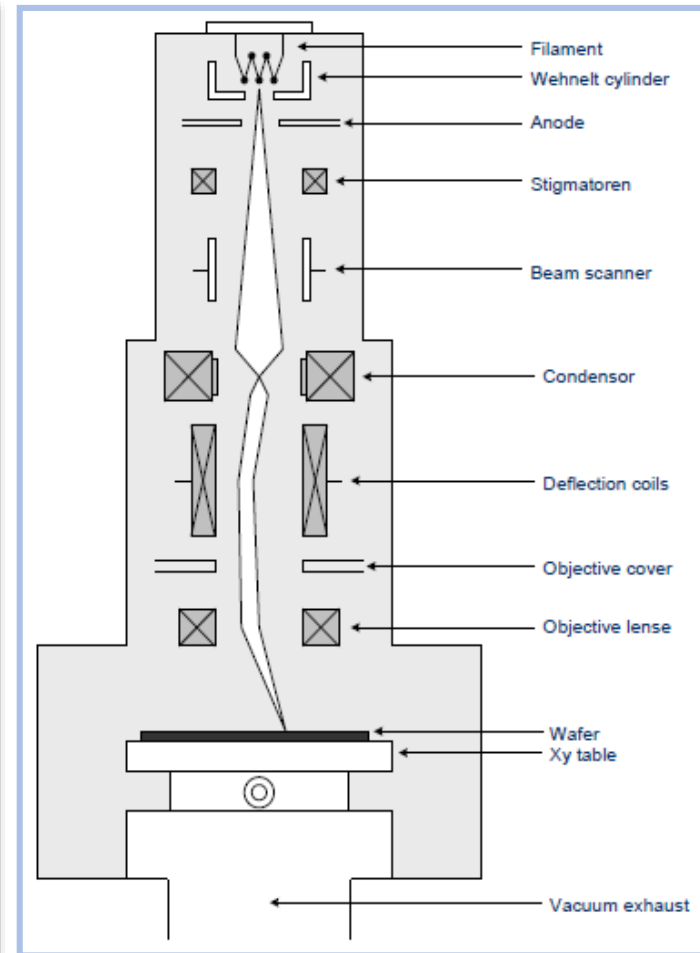
Lithographie électronique

Comme dans la fabrication de photo-masques, un faisceau d'électrons focalisé balaye la plaquette et l'analyse se fait ligne par ligne.

Chaque structure doit être écrite l'une après l'autre, ce qui prend beaucoup de temps.

L'avantage est qu'il n'y a pas besoin de photo-masque, ce qui réduit les coûts.

Le processus est effectué sous vide.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Lithographie par rayons X

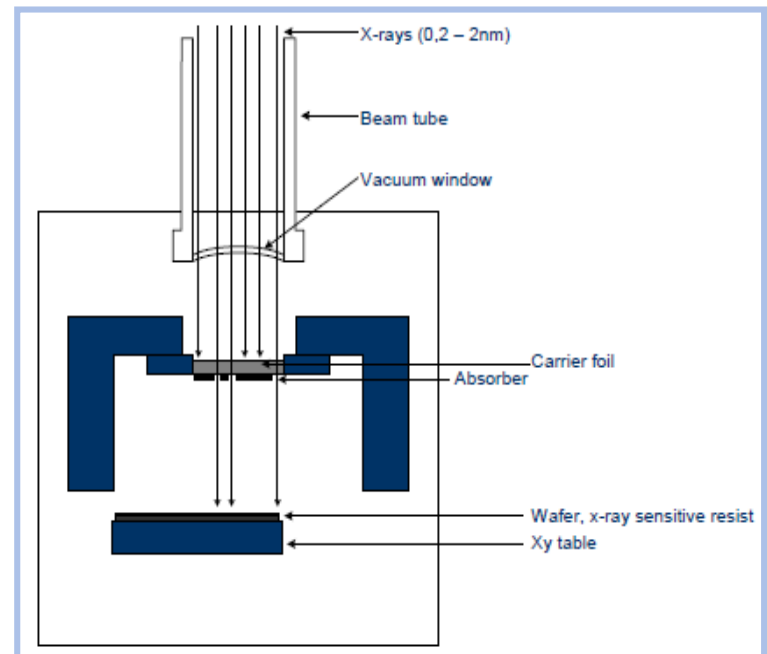
L'imagerie est réalisée à l'aide de la technique de « Step and repeat » dans une échelle de 1: 1 à la pression atmosphérique ou à basse pression dans une atmosphère d'hélium (environ 10.000 Pa).

La source de rayons X peut être un plasma ou un rayonnement synchrotron.

Au lieu de masques de verre au chrome, des feuilles minces en béryllium ou de silicium sont utilisées.

Pour absorber les RX, des éléments lourds comme l'or sont nécessaires.

La **résolution** de la lithographie aux rayons X est d'environ **40 nm**. L'installation ainsi que les masques **sont très chers**



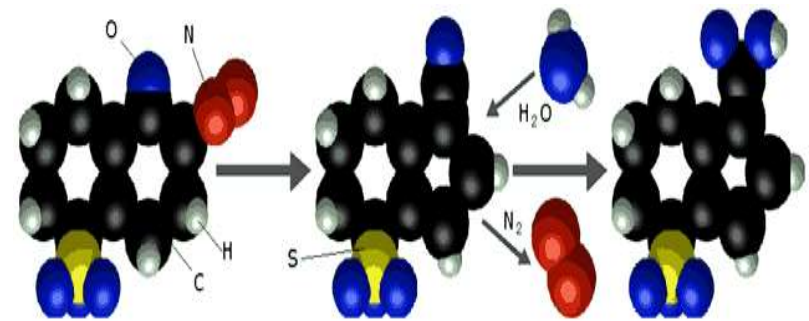
PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : **PHOTOLITHOGRAPHIE**

Résine photosensible

Il existe deux types de résines photosensibles: **positive** et **négative**, qui sont utilisés dans différentes applications.

Pour **les résines positives**, les zones exposées **sont solubles** alors que pour **les résines négatives**, les zones exposées **sont insolubles** et ce pour le développement chimique humide.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Caractéristiques des résines positives

- ❖ Excellente résolution;
- ❖ Stable contre les développeurs;
- ❖ Peut être développé dans des révélateurs aqueux;
- ❖ Mauvaise résistance dans des procédés de gravure ou d'implantation;
- ❖ Mauvaise adhérence sur la tranche;

Caractéristiques des résines négatives

- ❑ Haute sensibilité
- ❑ Bonne adhérence
- ❑ Excellente résistance aux procédés de gravure ou d'implantation
- ❑ Moins cher que les résines positives
- ❑ Résolution inférieure
- ❑ Développeurs organiques sont nécessaires (toxiques)

PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Composition chimique

Les résines photosensibles sont composées d'agents adhésifs, des sensibilisateurs et des solvants.

Liant (20%): Le liant utilisé est le novolac, qui est une résine de synthèse pour contrôler les caractéristiques thermiques de la résine photosensible.

Sensibilisateur (10%): Le sensibilisateur définit la photosensibilité de la résine. Les sensibilisateurs sont composés de molécules qui affectent la solubilité de la résine si elle est exposée à un rayonnement énergétique. Ainsi, la lithographie doit avoir lieu dans les zones à lumière ambiante avec une faible énergie.

Solvant (70%): Le solvant définit la viscosité de la résine. Par recuit, le solvant est vaporisé et la résine est stabilisée.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Développement

Les tranches exposées sont développées dans **des bains d'immersion** ou dans **des procédés de pulvérisation**. Bien que les bains d'immersion permettent le développement de plusieurs tranches à la fois, dans le développement de pulvérisation, les plaquette sont traitées l'une après l'autre.

Comme dans les procédés de revêtement de la photoresist, la plaquette est placée sur un mandrin et pulvérisée avec de produits chimiques de développement tout en tournant la plaquette à bas régime. le processus de développement ultérieur de la plaquette est arrêtée avec de l'eau.

Quelques avantages de la mise au point de la pulvérisation par rapport aux bains d'immersion sont:

- Les plus petites structures peuvent être développées;
- Le produit chimique est renouvelé régulièrement;
- La quantité de produits chimiques utilisée est beaucoup moindre.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Inspection

Le développement de la résine doit être inspecté par la suite. Dans le cas d'une incidence angulaire de la lumière, l'uniformité de la couche ainsi que la mauvaise focalisation ou l'agglomération de la résine doivent être inspectées.

Si les structures sont trop minces ou trop larges, la résine doit être retirée et le processus doit être répété. Le motif de la résine doit être ajusté précisément à la couche sous-jacente ou le processus doit être répété aussi.

Différents repères d'alignement sont utilisés pour étudier l'ajustement et la largeur des lignes.

La largeur des lignes est inspectée au microscope en exploitant les rayons lumineux en incidence dans la direction perpendiculaire sur la plaquette qui ne sont pas réfléchis par les bords dans l'objectif. Ainsi, les bords apparaissent comme des lignes sombres, ce qui peut être utilisé pour calculer la largeur de la ligne et de la distance à des lignes adjacentes.

PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Décapage de la photorésist

Une fois le motif a été transféré dans la couche sous-jacente dans les processus de gravure, ou après l'étape où le masque de résine a été utilisé dans l'implantation d'ions, la résine photosensible doit être enlevée.

Cela se fait avec des produits chimiques abrasifs (dissolvant), dans une étape de gravure à sec ou avec des solvants. L'acétone comme solvant peut être utilisé, car il ne corrode pas les autres couches sur la plaquette.

A cause d'un procédé de gravure à sec ou l'implantation d'ions, la résine pourrait être durci, de sorte que les solvants ne peuvent pas l'enlever.

Dans ce cas, la résine peut être enlevée avec une dilution de solvant à environ 80 °C dans un bain d'immersion.

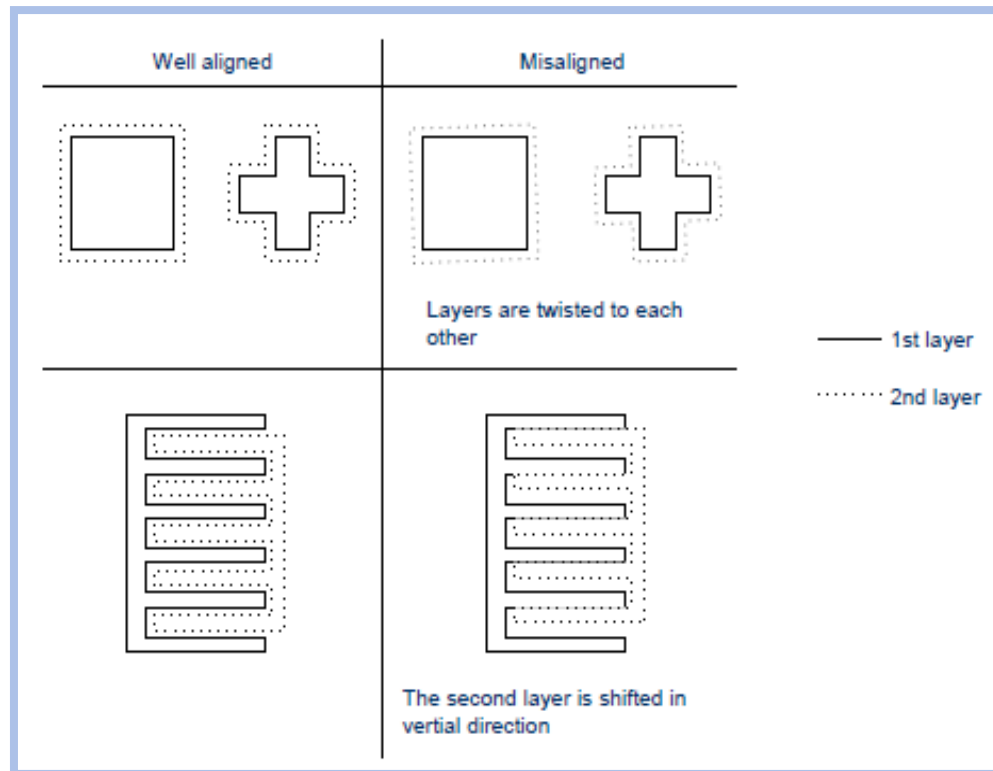
Si la résiste a été chauffée à $T > 200$ °C, même le remover ne peut pas l'enlever. Dans ce cas, la résine doit être éliminée dans un procédé d «ashing process ».



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Illustration des repères d'alignement



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Aligneur de masques

L'aligneur de masques est une machine qui permet le transfert des motifs d'un masque sur une couche donnée d'un substrat.

Wavelength range UV400: 350 – 450 nm



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Types d'exposition d'un aligneur de masques

- Il y a 3 types d'exposition
- Align + Exposition → Mask+Wafer
- Flood Exposition → sans Mask
- Test Exp → Exposition par secteur pour évaluation de la dose



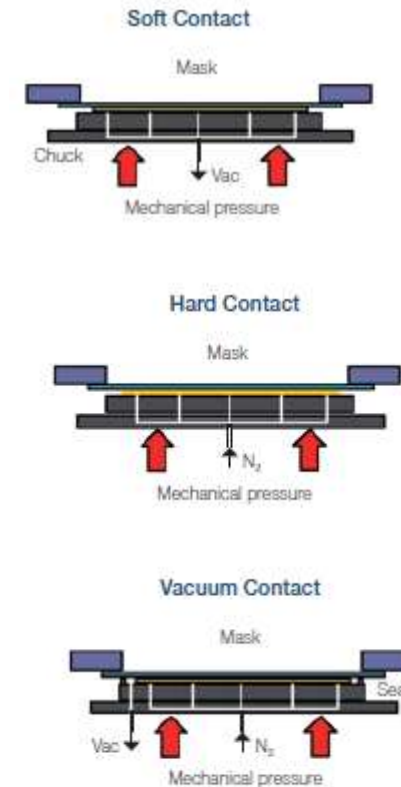
PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Modes d'exposition

Il y a 5 modes

- Soft contact
- Hard contact
- Vacuum contact
- Low vacuum contact
- Gap exposure



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Tolérance : La tolérance pour l'intensité est calculée selon l'expression :

$$100 \times (I_{\text{Max}} - I_{\text{Min}}) / (I_{\text{Max}} + I_{\text{Min}}) \text{ (le résultat est en } \pm\% \text{)}$$

$$I_{\text{moyenne}} = 24.3 \text{ mW/cm}^2 \quad \text{pour } 365 \text{ nm}$$

$$I_{\text{moyenne}} = 56.8 \approx 57 \text{ mW/cm}^2 \quad \text{pour } 405 \text{ nm}$$

Temps d'exposition : Le temps d'exposition est à évaluer à partir de l'expression :

Temps d'exposition = Dose résine / l'intensité de la lampe de la machine

Dans notre cas, le temps d'exposition = 120
(mJ/Cm²) / 57 mW/cm² = 2.1s



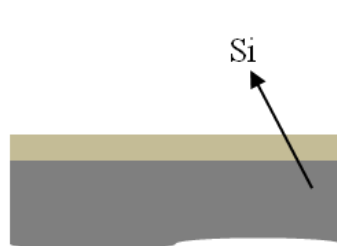
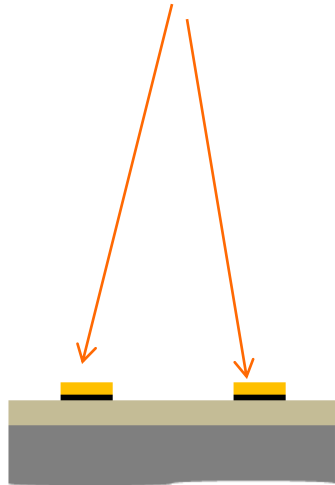
PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

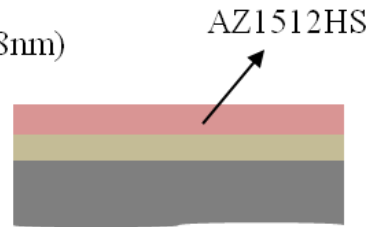
Procédé lift off

Pour réaliser ces contacts

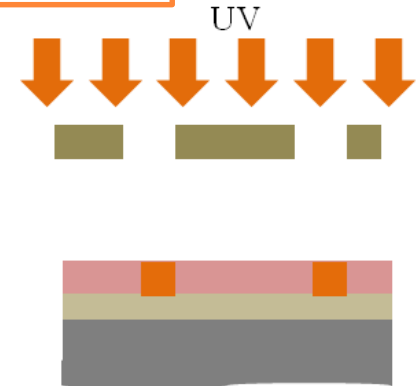
On passe par ces 6 étapes appelées lift-off



Step 1: Clean Wafer



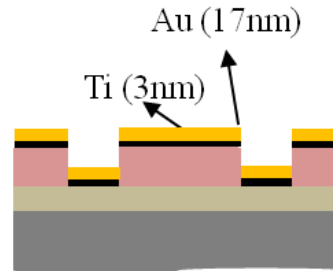
Step 2: Photoresist Deposition



Step 3: UV Exposure



Step 4: Development



Step 5: Metallization



Step 6: Lift-off



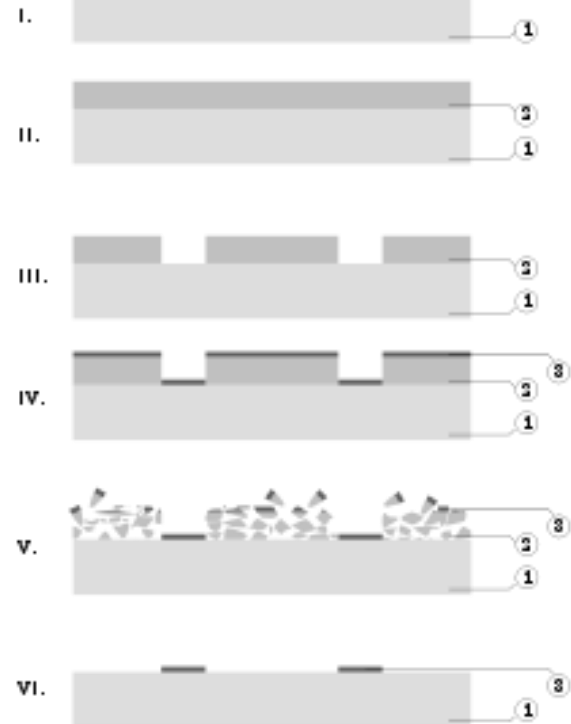
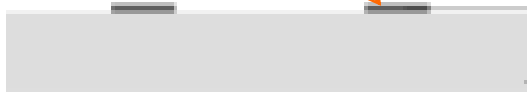
PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : PHOTOLITHOGRAPHIE

Procédé lift off

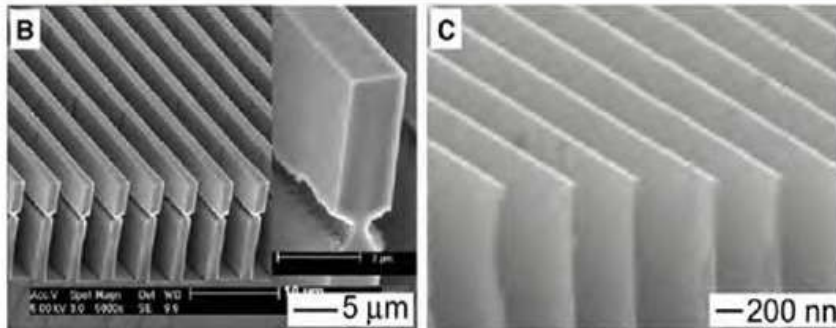
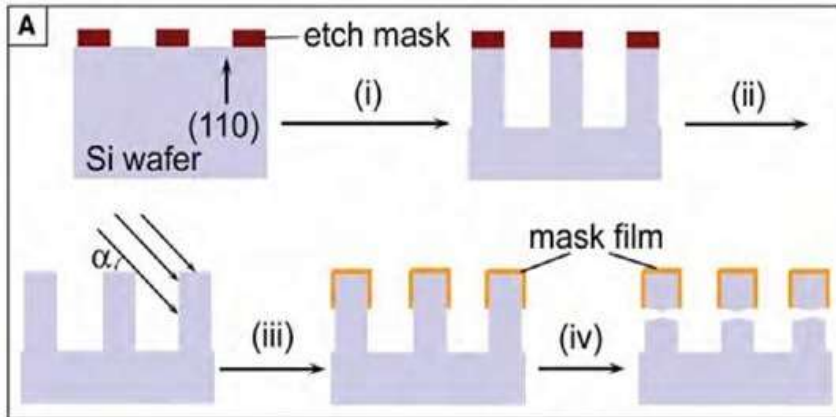
On passe par ces 6 étapes appelées lift-off

Pour réaliser ces contacts



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : GRAVURE

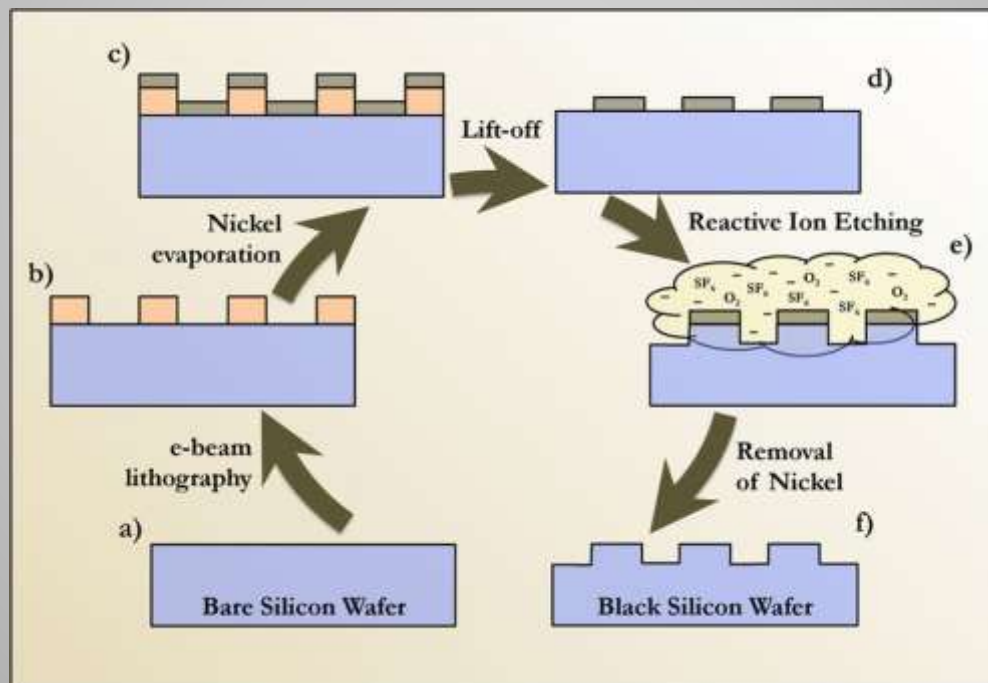


PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : GRAVURE

Définition

La **gravure** est un procédé technologique qui consiste à **retirer une ou plusieurs couches** de matériaux à **la surface d'un substrat**.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : GRAVURE

Différents types de gravure

Il existe plusieurs types de gravure, chacun ayant ses propriétés — avantages et inconvénients — spécifiques.

Les différents types de gravures peuvent être classées en deux grandes familles:

- ❑ Gravures **chimiques**;
- ❑ Gravures **physiques**.

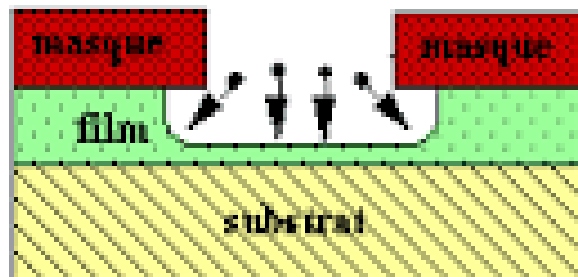
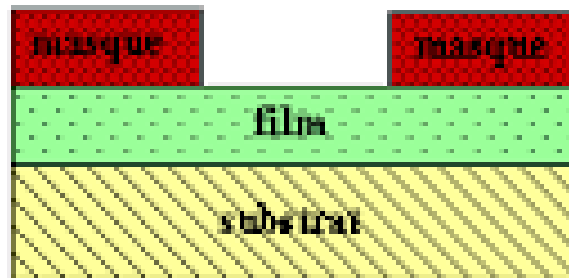


PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

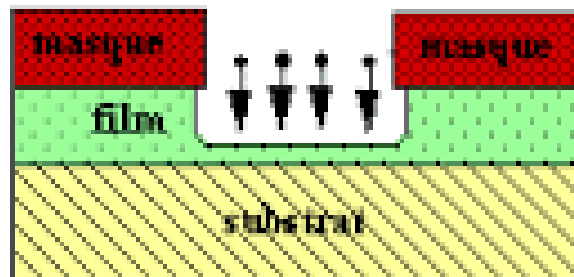
PARTIE : GRAVURE

Détermination des zones à graver

Pour chaque étape de gravure, une partie du substrat est protégée de la gravure par une couche protectrice qui résiste à cette gravure
(Généralement de la résine photosensible)



gravure isotropique



gravure anisotropique

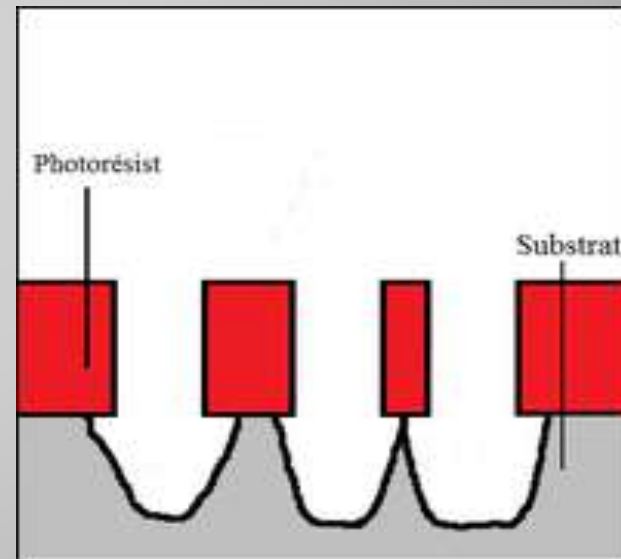
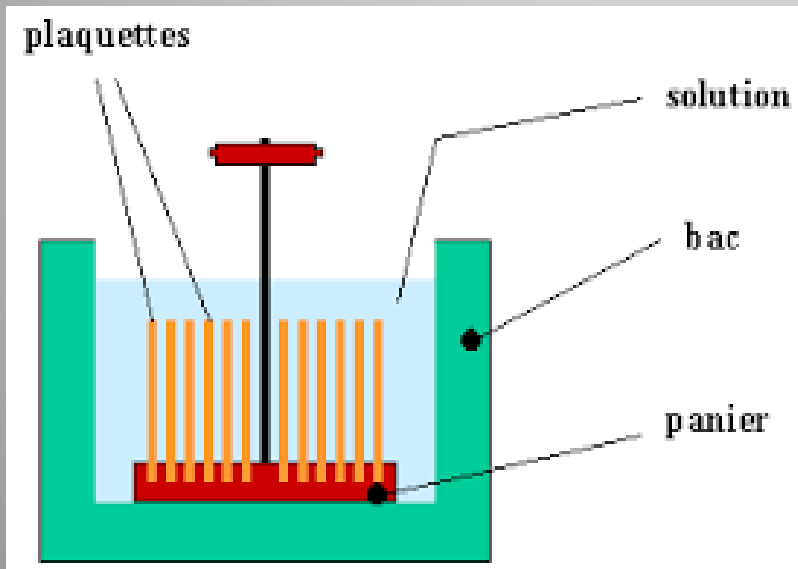


PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : GRAVURE

Gravures chimiques (humide)

Le substrat (en partie protégé) est plongé dans une solution qui va attaquer chimiquement la surface du substrat non-protégée



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : GRAVURE

Avantages et inconvénients de la gravure chimique facile à mettre en œuvre, et peut être facilement industrialisée;

- ❑ Le **taux de gravure** est particulièrement **élevé**, ce qui rend **la gravure rapide**;
- ❑ Elle présente une **bonne sélectivité** des **matériaux** (tendance **à ne réagir** qu'avec **certaines couches**. par exemple, dans le cas d'un substrat composé d'une couche de GaAs et d'une couche d'AlAs, l'acide chlorhydrique aura tendance à n'attaquer que la couche de GaAs).
- ❑ Son **inconvénient majeur** est qu'elle est **fortement isotrope**, c'est-à-dire que **l'acide** va **attaquer le substrat** dans **toutes les directions**, donnant un profil de gravure presque semi-sphérique.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : GRAVURE

Gravures Physiques

Les gravures physiques (ou sèches) ont été développées pour pallier au problème de la forte isotropie des gravures chimiques.

Les gravures physiques reposent sur le bombardement de la surface à graver par des ions généralement issus d'un plasma.



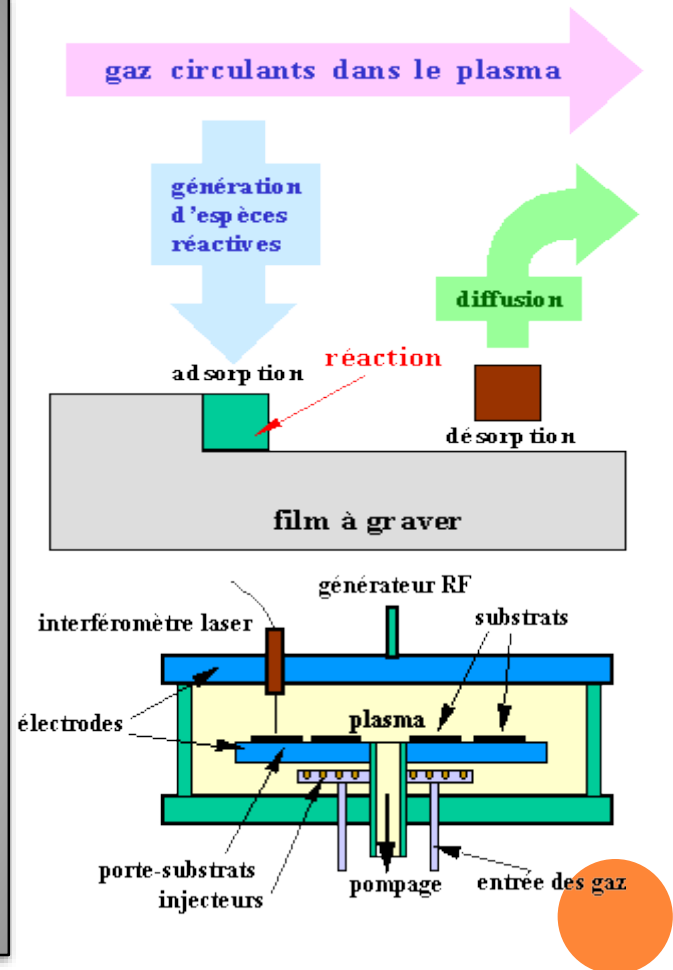
PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : GRAVURE

Mécanismes de la gravure physique

Le principe du procédé est le suivant:

- ❑ **Génération**, dans le plasma, **des espèces** pouvant attaquer chimiquement la couche,
- ❑ **Transfert des espèces** réactives depuis le plasma **vers la surface de la couche** à graver,
- ❑ **Adsorption de l'espèce** attaquante à la surface,
- ❑ **Réaction avec la matériau de surface**. Le matériau produit par la réaction doit être **volatile pour pouvoir quitter la surface**,
- ❑ **Désorption du produit** de réaction,
- ❑ **Diffusion** dans l'environnement gazeux.



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : GRAVURE

Gravure ionique réactive

La gravure ioniques réactives est en réalité une technique de **gravure plasma** dans laquelle interviennent à la fois les effets de bombardement par des ions et la réaction chimique.

Elle est obtenue en ajoutant au gaz plasmagène relativement inerte chimiquement un gaz fortement réactif : en général un dérivé du fluor pour Si (SF₆, CF₄) ou du chlor pour GaAs (Cl₂, BCl₃).

Elle est souvent désignée par son acronyme anglais **RIE** (pour **Reactive Ion Etching**)



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : GRAVURE

Avantages et inconvénients de la gravure physiques

Elle présente l'avantage d'une forte anisotropie de la gravure (la frontière entre les zones gravés et non gravées sera la plupart du temps rectiligne et verticale).

Cependant elle présente de nombreux inconvénients:

- ❑ **Mise en œuvre** difficile par rapport à la gravure chimique ;
- ❑ Vitesse de gravure relativement faible (temps ↑);
- ❑ Elle n'a aucune sélectivité;
- ❑ Le bombardement des ions endommage fortement la surface, réduisant ainsi ses caractéristiques électriques (Il est possible, cas du Si, de reformer le réseau cristallin par un recuit à température élevée, chose impossible pour des semi-conducteurs composés qui se dissocient à température élevée)



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : GRAVURE

COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS DES GRAVURES CHIMIQUE ET PHYSIQUE

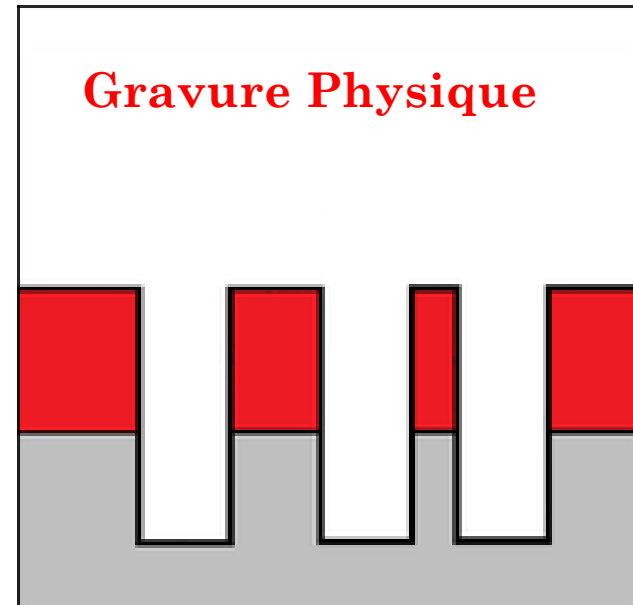
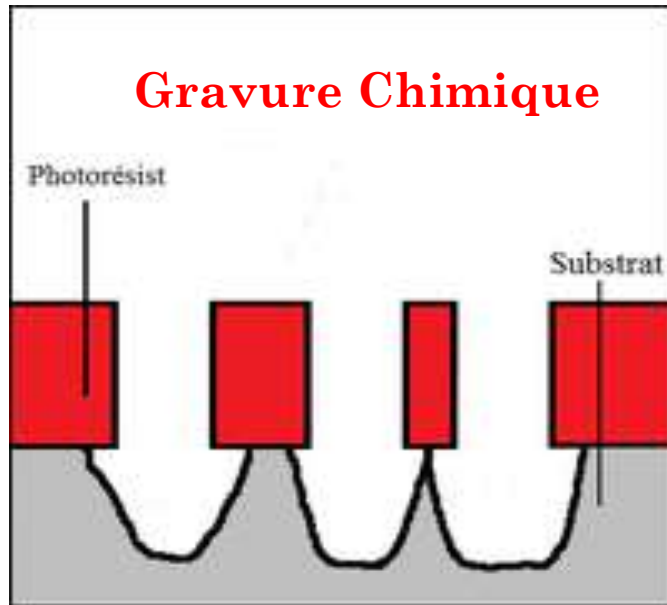
	Gravure humide	Gravure sèche
Sélectivité	Élevée	Faible
Coût de la gravure	Faible	Élevé
Durée	Importante	Faible
Technologie submicronique	Difficile	Aisée
Anisotropie	Non	Oui
Défauts spécifiques	Effet galva	Dommages par rayonnement
Coût environnement	Élevé	Faible
Consommation de produits	Élevée	Faible
Contrôle	Difficile	Assez bon



PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : GRAVURE

Comparaison : Gravure chimique et gravure physique



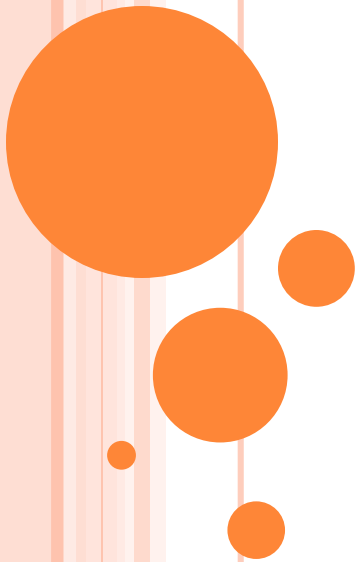
PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES DE BASE

PARTIE : GRAVURE

Matériau à graver	Espèces chimiques utilisés	Gaz utilisés pour RIE
Al (aluminium)	80 % H_3PO_4 , 5% $C_2H_4O_2$, 5% (HNO_3) , 10 % (H_2O) à 35-45 °C	Cl_2 , CCl_4 , $SiCl_4$, BCl_3
Si (Silicium)	(HNO_3) + (HF)	CF_4 , SF_6 , SiF_4 , BCl_3 , NF_3 , Cl_2 , CCl_2F_2
GaAs (Arséniure de gallium)	HCl	Cl_2 , CCl_4 , $SiCl_4$, BCl_3 , CCl_2F_2
Cr (Chrome)	HCl	Cl_2
SiO_2 (Dioxyde de silicium)	HF ou $(HF + NH_4F + H_2O)$	CF_4 , H_3F , SF_6 , NF_3
Si_3N_4 (Nitrure de silicium)	$(H_3PO_4 85\%)$ à 180 °C	CF_4 , SF_6 , NF_3



Techniques de réalisation Des couches minces



TECHNIQUES DE RÉALISATION DES COUCHES MINCES

Les principales techniques utilisées sont:

- Epitaxie par Jets Moléculaire (MBE);
- Epitaxie en phase vapeurs aux organométalliques (MOCVD);
- Dépôt chimique en phase vapeur (CVD);
- PECVD;
- LPECVD;
- Evaporation thermique;
- Evaporation par faisceau d'électron;
- Pulvérisation cathodique (sputtering);
- Ablation laser (ALD);
- Electrodéposition;
- Sol-gel



TECHNIQUES DE RÉALISATION DES COUCHES MINCES

Résumé des points principaux relatifs à l'épitaxie par MBE

Vitesse de croissance	Préparation des substrats	Dopage	Température
<p>De l'ordre du $\mu\text{m/h}$</p> <p>N.B. : La vitesse de croissance est faible ; ce qui constitue un avantage pour déposer des couches très minces</p>	<p>L'opération est conduite dans une enceinte ultravide (10^{-11} torr).</p> <p>Pour GaAs on a :</p> <ul style="list-style-type: none">-T du creuset As=300°C-T du creuset Ga=1000°C	<p>-Dopage type n : Antimoine Sb</p> <p>-Dopage type p : Beryllium Be</p>	<p>(température du substrat).</p> <p>$\approx 550^\circ\text{C}$ pour GaAs</p>



TECHNIQUES DE RÉALISATION DES COUCHES MINCES

Résumé des points principaux relatifs à l'épitaxie en phase liquide

Vitesse de croissance	Préparation des substrats	procédé	Température
De l'ordre du $\mu\text{m}/\text{min}$	Les dépôts sont précédés par un nettoyage in-situ des substrats (dissolution du substrat)	L'opération est conduite sous une atmosphère réductrice d' H_2 . Le creuset est refroidit lentement ($0.1^\circ\text{C}/\text{min}$)	$\approx 730^\circ\text{C}$ pour GaAs



TECHNIQUES DE RÉALISATION DES COUCHES MINCES

Résumé des points principaux relatifs à l'épitaxie en phase vapeur

Vitesse de croissance	Préparation des substrats	Dopage	Température
De l'ordre du $\mu\text{m}/\text{min}$	Les dépôts sont précédés par une attaque chimique in-situ des substrats (dans le cas du Si, on utilise des vapeurs chlorhydriques)	Dopage au cours de l'élaboration de la couche \Rightarrow un profil uniforme	(température substrat) $\approx 1000\text{ }^\circ\text{C}$



TECHNIQUES DE RÉALISATION DES COUCHES MINCES

Avantages et inconvénients de l'évaporation thermique

○ Avantages

- Technique simple;
- Dépôts adéquats pour le process **lift-off**.

○ Inconvénients

- Contamination potentielle par la nacelle elle-même,
- Impossibilité d'évaporer des métaux à haute température de fusion,
- Limite sur l'épaisseur de la couche déposée étant donnée la faible quantité de métal pouvant être déposée dans la nacelle.



TECHNIQUES DE RÉALISATION DES COUCHES MINCES

Avantages et inconvénients de l'évaporation par faisceau d'électrons

L'avantage principal de cette technique

- Pureté des couches déposées;
- Dépôts dits "lift-off", nécessitant un flux incident proche de la normale de la surface du substrat.

Les deux inconvénients principaux liés à cette technique sont:

- Emission de rayons X pouvant endommager les surfaces des substrats;
- Ejection de gouttelettes hors du creuset pouvant se déposer sur les substrats dans le cas où une trop forte puissance est utilisée;
- Dépôt par évaporation d'alliages est complexe et la composition de la couche déposée est difficile à maîtriser.



TECHNIQUES DE RÉALISATION DES COUCHES MINCES

Avantages et inconvénients de la pulvérisation cathodique

1. Avantages liés à cette technique

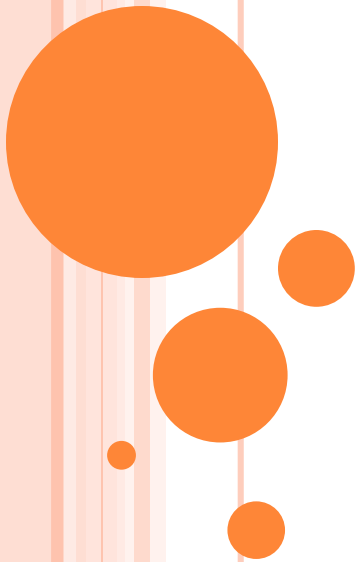
- Procédés basse température;
- Possibilité de pulvériser relativement facilement des matériaux possédant de très hauts points de fusion;
- Composition de la couche proche de celle de la cible servant de source de matériau;
- Bonne adhérence des couches développées et bonne couverture des marches;
- Large gamme de revêtements métalliques et céramiques possibles;
- Accroissement de la densité des couches en croissance;
- Élimination des impuretés et des espèces non suffisamment adhérentes.

2. Inconvénients de la technique

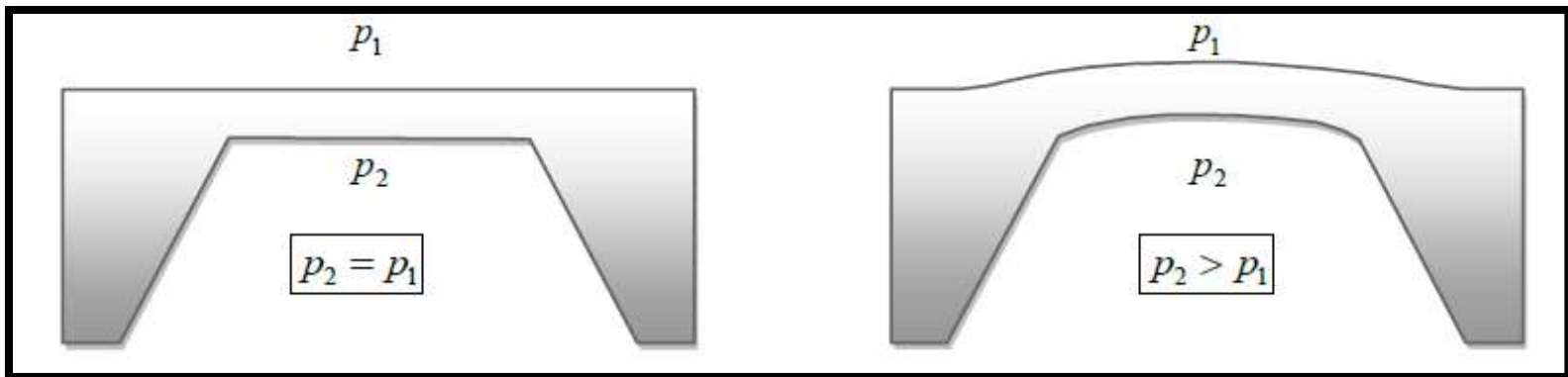
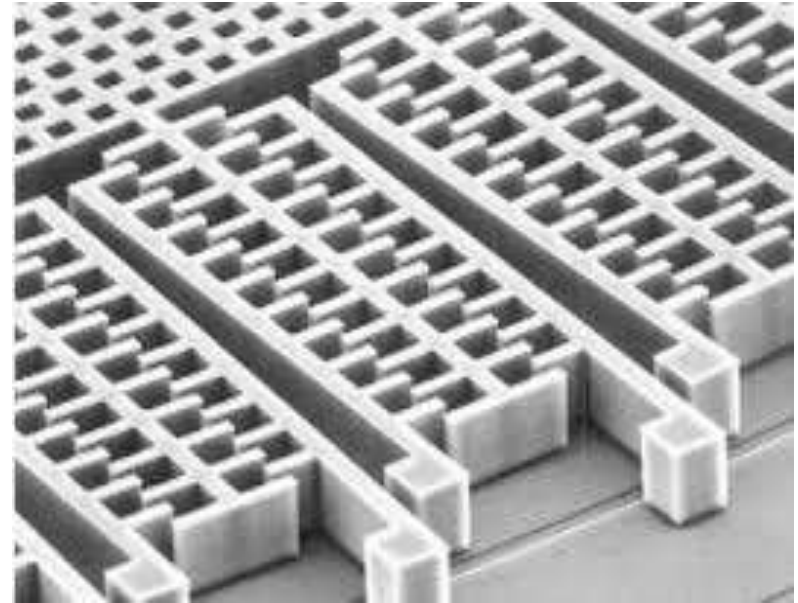
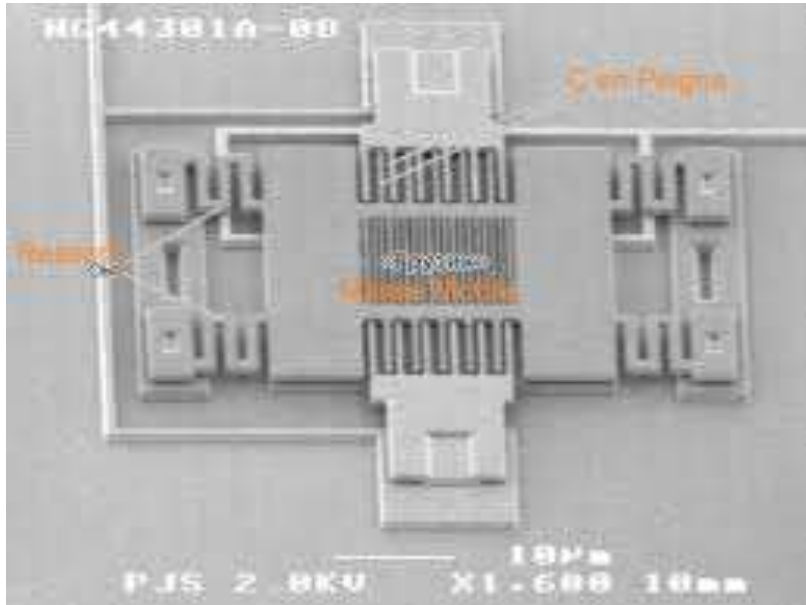
- Vitesse de croissance limitée;
- Dégradation possible pour les substrats les plus sensibles.



Aperçu sur la technologie des MEMS



APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS



APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

Définition

Un microsystème électromécanique (**MEMS = Micro Electro Mechanical Systems**) est un microsystème comprenant un ou plusieurs éléments **mécaniques**, utilisant **l'électricité** comme source **d'énergie**, dans le but réaliser une fonction de **capteur** ou **d'actionneur**, avec **au moins une structure** présentant **des dimensions** de l'ordre du **micromètre**.

Réalisation

Les MEMS **sont réalisés** par des procédés de fabrication **issus de la micro-électronique**.



APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

Terminologie

A cause des développements rapides dans le domaine des MEMS, plusieurs termes dérivés sont utilisés pour désigner des MEMS spécialisés.

- Dans le **domaine optique** on utilise le terme **MOEMS** (Micro Opto Electro Mechanical Systems) ou **Optical MEMS** ;
- Dans le **domaine biologique** on utilise **bioMEMS**;
- Pour les MEMS de taille submicronique, on utilise le terme **NEMS** (**Nano Electro Mechanical Systems**).
- N.B. : MST= Micro-System Technology (en Europe)



APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

Matériaux largement utilisés

- ❑ **Silicium:** C'est le **matériau de Hooke** presque parfait, i.e. il fléchit il est fléchi il ne subit pratiquement **pas d'hystérésis, donc** aucune dissipation d'énergie, il souffre **très peu de fatigue** et peut avoir des durées de vie de l'ordre de plusieurs milliards de milliards de cycles sans rupture.
- ❑ **Métaux:** Al, Au, Ag,, Cr, Cu, Ni, Ti, W, Pt,....
- ❑ **Diélectriques:** Verre, Résines et oxydes
- ❑ **Polymères:** Notamment pour la micro-fluidique



APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

Composition

Un MEMS est composé de mécanismes mécaniques (**membranes, poutres, micromoteurs**, etc.) réalisés sur un substrat, généralement du silicium, à l'échelle micrométrique.

Mouvement mécanique

Les différents éléments mécaniques sont mis en mouvement grâce aux forces générées par **des transducteurs électromécaniques** alimentés **par des tensions** produites avec des **circuits électroniques** avoisinants.

Les **transducteurs électromécaniques** jouent alors le **rôle de l'interface** entre les domaines **mécanique** et **électrique**.

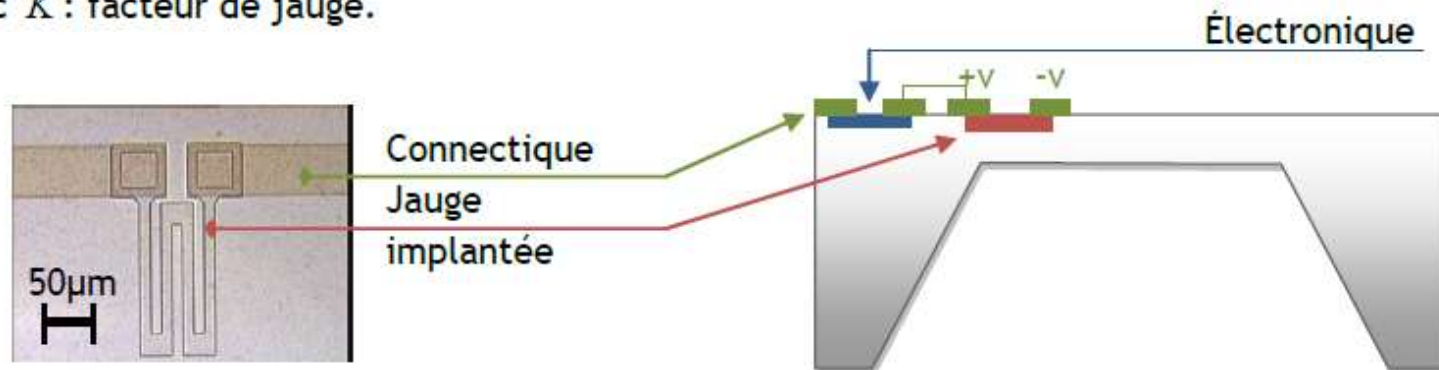


APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

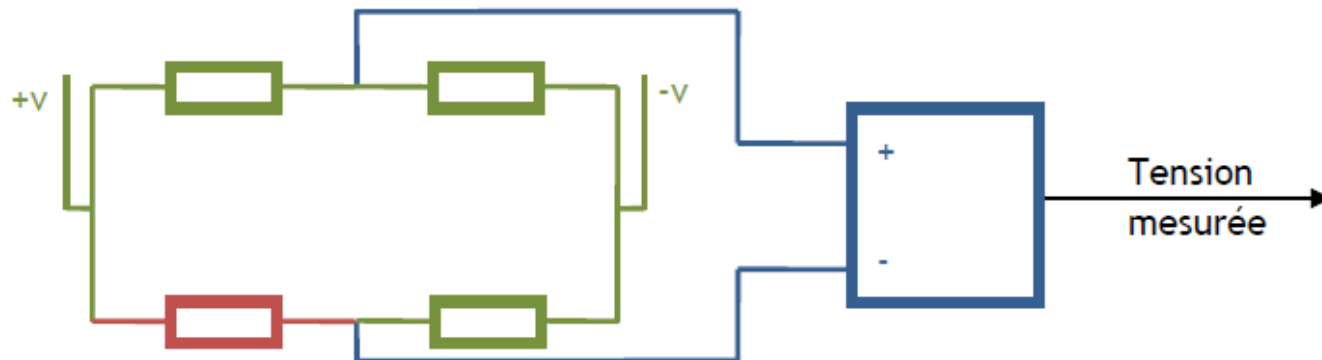
Principe de fonctionnement

$$\left[\frac{\Delta R}{R} \right] = K \left[\frac{\Delta l}{l} \right]$$

avec K : facteur de jauge.



Implantation intégrée d'une jauge piézorésistive

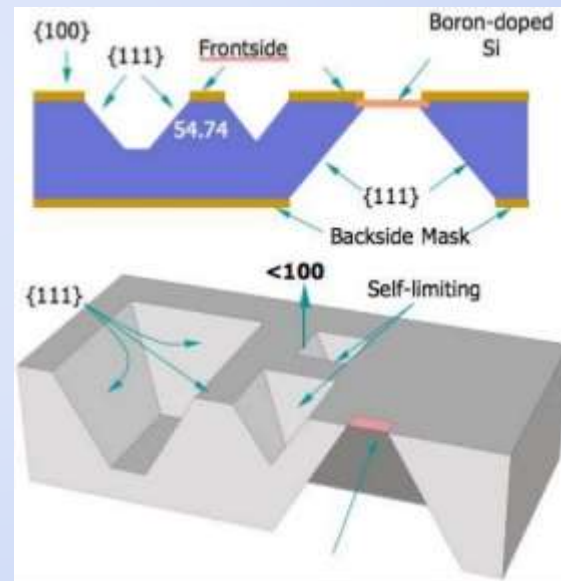


APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

Technologies

Il existe 3 principales technologies, à savoir:

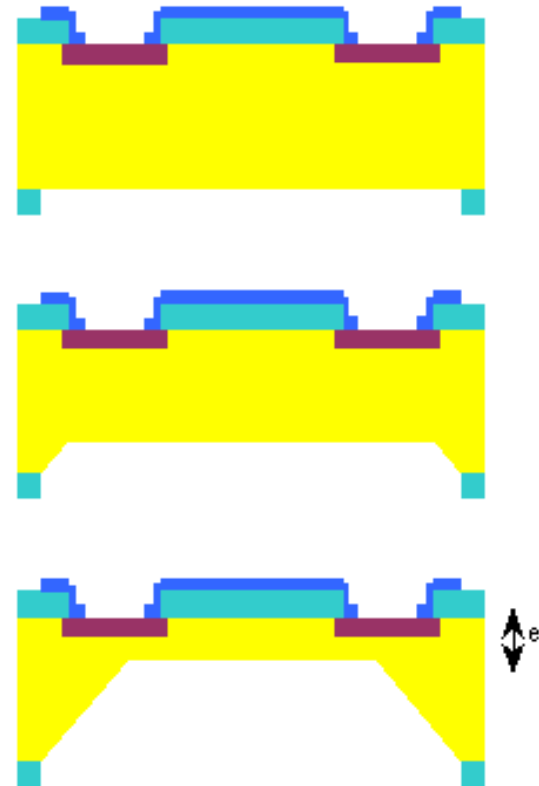
- ❑ Bulk Micromachining (Micro-usinage en volume);
- ❑ LIGA (Lithographie Galvanoformung Adformung);
- ❑ Surface Micromachining (Micro-usinage de surface).



APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

Micro-usinage en volume

Micro-usinage en volume diffère du micro-usinage en surface par le fait que le matériau de substrat, qui est généralement en silicium monocristallin, est façonné pour former une composante fonctionnelle importante du dispositif résultant



APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

Microusinage LIGA

LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung)

est un **acronyme allemand** qui signifie

Lithographie, Galvanoformung, Abformung et qui

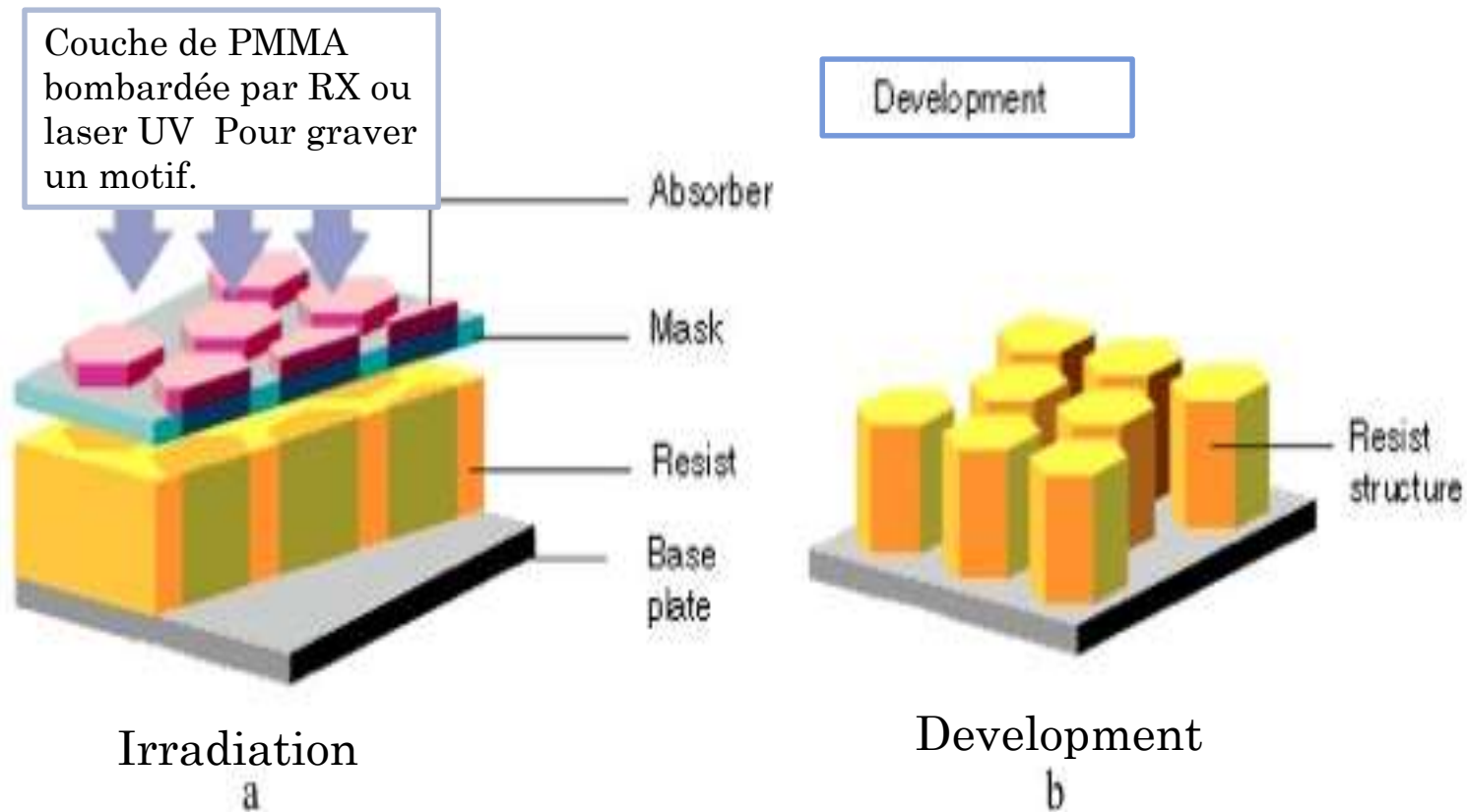
désigne les trois étapes de ce processus de

fabrication.



APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

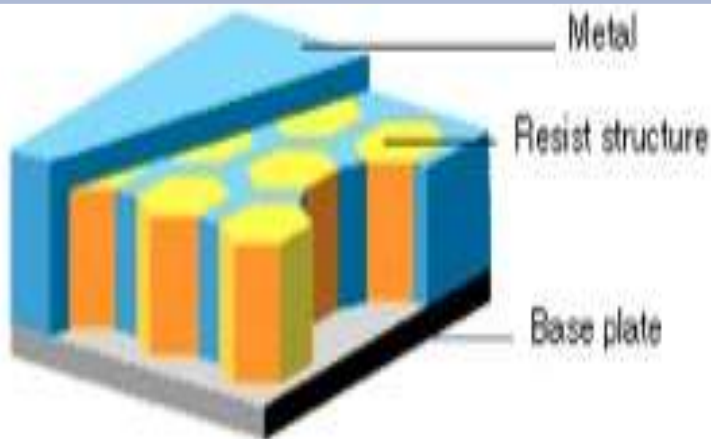
Etapes du microusinage LIGA



APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

Etapes du microusinage LIGA

Remplir les crevasses et espaces vides à l'aide de l'électro-déposition d'un métal qui débordera de la structure pour créer une base



Electroforming

c

Le PPMA est ensuite détruit pour révéler le moule en métal



Mould insert

d

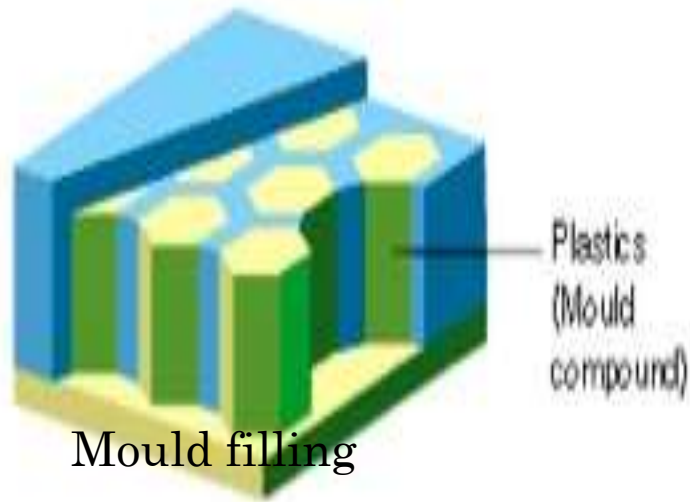


APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

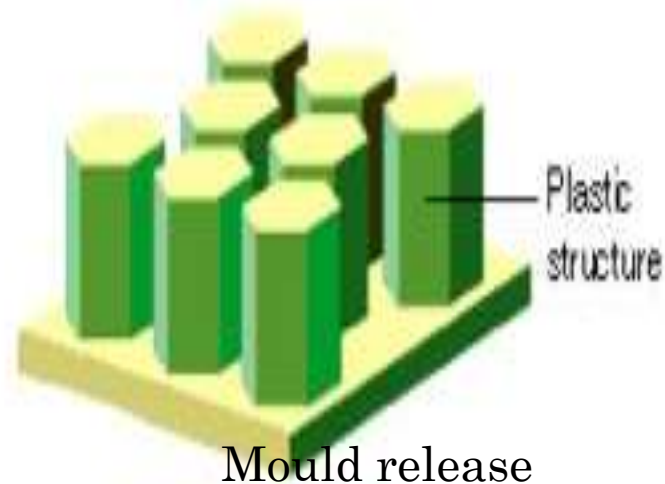
Etapes du microusinage LIGA

Remplir par un polymère, un métal, un plastique, ou une combinaison de ces matériaux qui servira à la fabrication d'une pièce mécanique

Enlèvement du moule qui peut être utilisé plusieurs fois



e



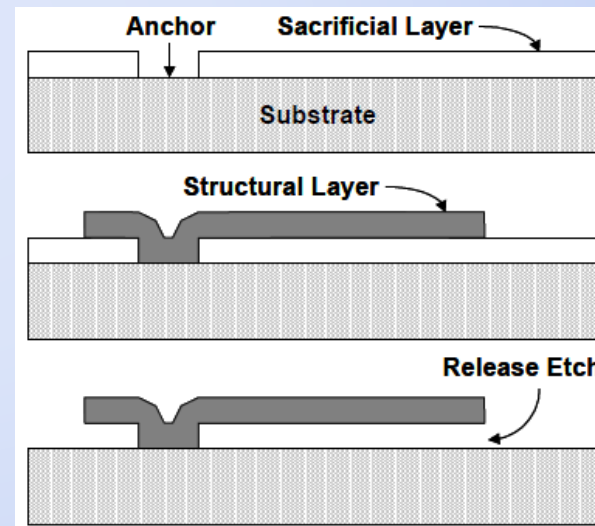
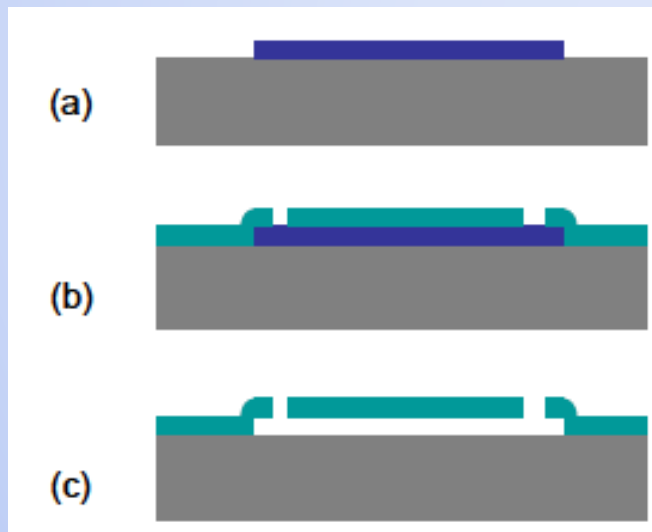
f



APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

USINAGE DE SURFACE

L'usinage de surface utilise le dépôt ou la croissance de couches minces, **appelées couches sacrificielles**, sur un substrat et leur gravure sélective. A la différence de l'usinage de volume, le matériau structural n'est pas le substrat mais la couche mince ajoutée.



APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

Soudage (scellement) des substrats

Des substrats identiques ou de natures différentes et de mêmes dimensions peuvent être soudés en cours ou en fin de procédé, après alignement en utilisant les techniques de scellement suivantes:

- ❑ Soudure anodique;
- ❑ Soudure par contact direct;
- ❑ Soudure par adjonction d'une couche intermédiaire.



APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

Soudure anodique (électrostatique)

La soudure anodique permet de souder un substrat en verre (verre dopé Bore et contenant du sodium) et un substrat en silicium (oxydé ou non) à une température voisine de 420°C (à cette température les coefficients de dilatation du verre et du silicium sont proches), sous vide (ou non) en appliquant une pression mécanique et une tension continue (400-700 V).



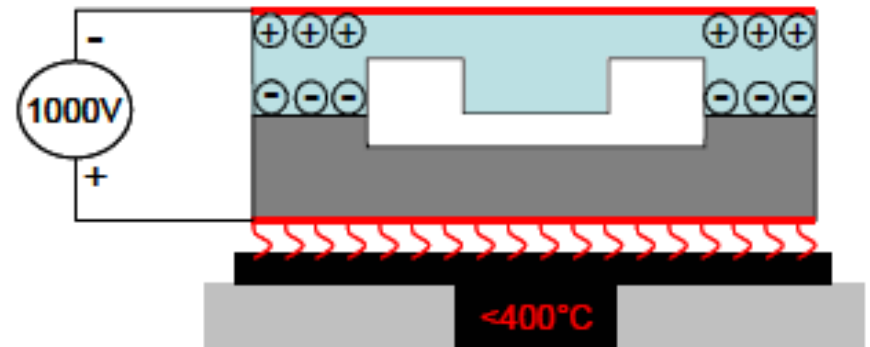
APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

Étapes

- Nettoyage des substrats;
- Mise en contact des substrats;
- Chauffer l'ensemble (350-450°C);
- Générer un courant électrique d'une tension de 50 V à 1 000 V

Soudure anodique (Si/verre)

- + température (300-400°C)
- limité au verre (ou silicium oxydé), propreté



APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

Soudage par contact direct

Le procédé de soudure directe du silicium est obtenu en deux étapes:

- ❑ Hydrophilisation préalable (par voie chimique ou par plasma) de la surface d'un (ou des deux) substrat(s);
- ❑ Mise en contact des substrats en contact intime (pression mécanique).

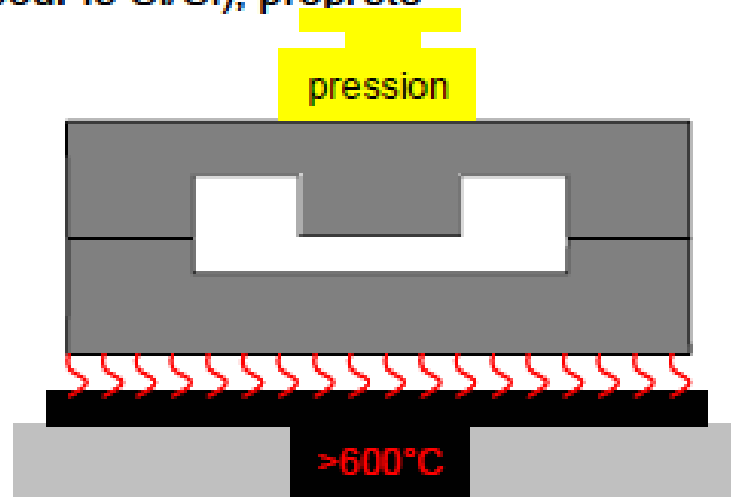
Le procédé de mise en contact se déroule généralement **sous vide** et est suivi d'une **étape de traitement thermique** qui permet de renforcer le scellement.



APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

Soudure thermique (Si/Si, verre/verre)

- + robuste, bien connue
- température ($> 600^{\circ}\text{C}$ pour le verre/verre, $> 1000^{\circ}\text{C}$ pour le Si/Si), propreté



APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

Soudure adhésive

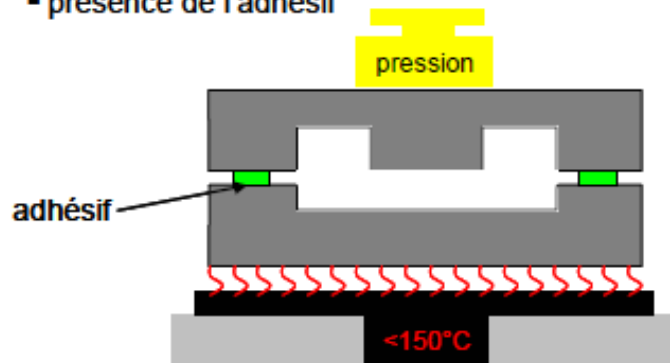
Il est aussi possible de souder deux substrats en intercalant des polymères du type SU8, polyimides, BCB, etc.

Les deux substrats, sous vide et après traitement thermique (rampes et paliers de températures) sont mis en contact (pression mécanique).

Soudure adhésive (tout substrat)

+ température ($<150^{\circ}\text{C}$), propreté

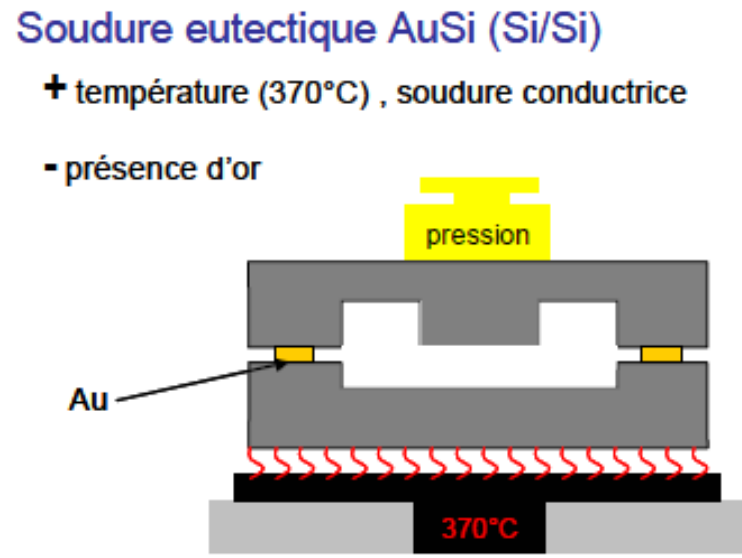
- présence de l'adhésif



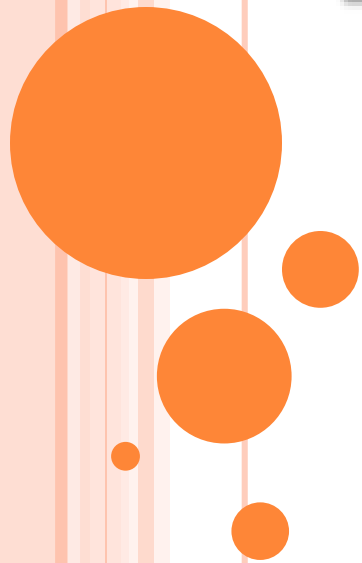
APERÇU SUR LA TECHNOLOGIE DES MEMS

Soudure eutectique.

Une autre technique de soudage consiste à réaliser un alliage Au-Si à une température voisine de 360°C par diffusion thermique sous une pression mécanique de l'or dans le silicium (ou autre couche). La soudure entre les deux substrats se produit lors de la phase de refroidissement.



Applications Biomédicales des MEMS



TECHNOLOGIE ET MÉDECINE

Maladies et dispositifs implantables

Parmi les maladies qui font appel à la microélectronique (miniaturisation) et les MEMS, on cite:

- ❑ L'épilepsie (VNS);
- ❑ Le parkinson (DBS);
- ❑ Les maladies cardiaques (Pacemaker);
- ❑ L'incontinence (AMS 800);
- ❑ Le diabète.



LES MEMS AU SERVICE DE LA SANTÉ

- ❑ Les premiers dispositifs MEMS à utiliser dans l'industrie biomédicale étaient des **capteurs de pression artérielle** durant les années 1980;
- ❑ Les accéléromètres MEMS utilisés dans **les défibrillateurs et les stimulateurs cardiaques**;
- ❑ Transducteur **d'aide auditive**;
- ❑ Systèmes microfluidiques pour le diagnostic impliquant le mouvement, le mélange et le contrôle de petits volumes de fluides (de l'ordre du nanolitres) comprenant des aiguilles, des canaux, des vannes, des pompes, des mélangeurs, des filtres, des capteurs, des réservoirs et des distributeurs;
- ❑ Microfluidique s permettant des technologies avancées **d'administration de médicaments** telle que **la libération programmée**;
- ❑ Outils de **la microchirurgie**.



PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE



PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

MOTIVATIONS

Motivations pour les micro-pompes à base de MEMS

Besoins de flux de fluide contrôlé, pour diverses applications médicales et autres tels que:

- ❑ l'analyse de l'ADN, les dispositifs de laboratoire sur puce, les systèmes d'analyse et les systèmes d'administration de médicaments;
- ❑ Refroidissement de liquide à base de micro-pompes et de micro-canaux pour des circuits intégrés électroniques;
- ❑ Administration d'un médicament personnalisé en réponse aux conditions de santé spécifiques du patient.



PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

PARAMÈTRES D'UNE MICROPOMPE

Les principaux paramètres qui caractérisent une micropompe sont les suivants:

- ❑ Débit maximal;
- ❑ Contre-pression représentée;
- ❑ Fréquences de fonctionnement (cas de micropompes à membrane);
- ❑ Fréquence de résonance;
- ❑ Puissance requise pour activer la pompe;
- ❑ Efficacité de la pompe ($P_u \text{ pompe} / P_u \text{ actionneur}$).



PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

CRITÈRES DE CONCEPTION

Les critères de conception d'une micropompe implantable sont :

- ❖ Petites dimensions;
- ❖ Biocompatibilité;
- ❖ Déplacement suffisant pour atteindre les débits souhaités et précis;
- ❖ Pression de pompage suffisante pour déplacer les médicaments;
- ❖ Faible consommation d'énergie;
- ❖ Fonctionnement sûr pendant une période prolongée.



PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

AVANTAGES

Les avantages attendus d'une micropompe sont:

- ❖ Réduction d'intervention manuelle;
- ❖ Réduction des quantités d'échantillons;
- ❖ Réduction de la consommation de réactifs;
- ❖ Amélioration de la qualité des expériences;
- ❖ Réduction du temps d'analyse;
- ❖ Réduction du coût de nombreux processus standards.



PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

STRUCTURE D'UNE MICROPOMPE

Les principaux éléments d'une micropompe sont:

- ❑ Chambre de transition des médicaments;
- ❑ Microvalves unidirectionnelles, telle que la valve d'entrée (connecté à un réservoir extérieur contenant les médicaments);
- ❑ Circuit de contrôle;
- ❑ Actionneur.



PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

ETAPES DE LA CONCEPTION

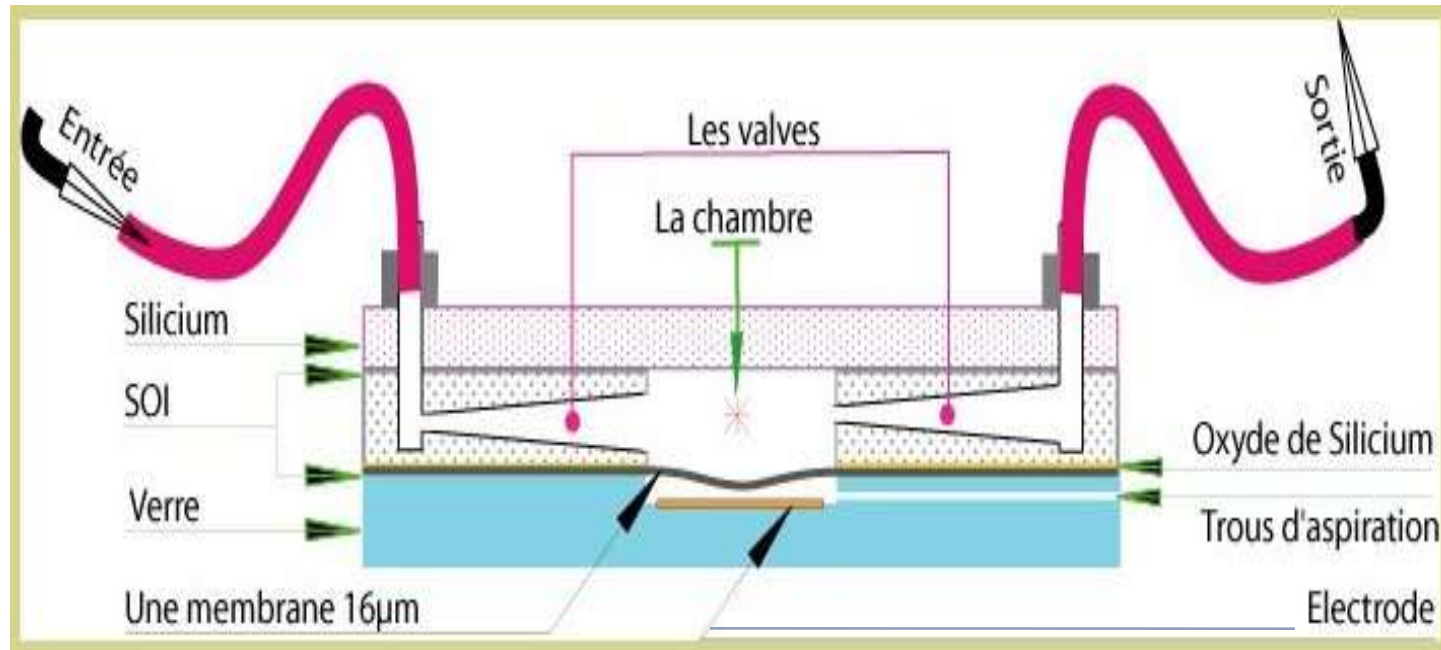
Pour concevoir une micropompe avec les performances requises, il faut:

- ❑ Définir le type de l'application envisagée;
- ❑ Catégorie de la micropompe (le principe de pompage le plus adéquat pour l'application);
- ❑ Définir l'actionneur qui correspond le mieux pour atteindre les performances désirées;
- ❑ Choisir le type de microvalves à utiliser.



PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

STRUCTURE DE LA MICROPOMPE



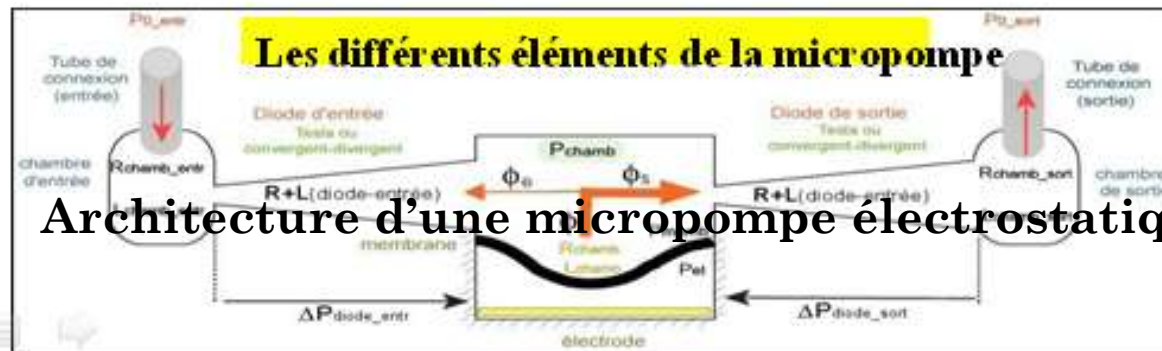
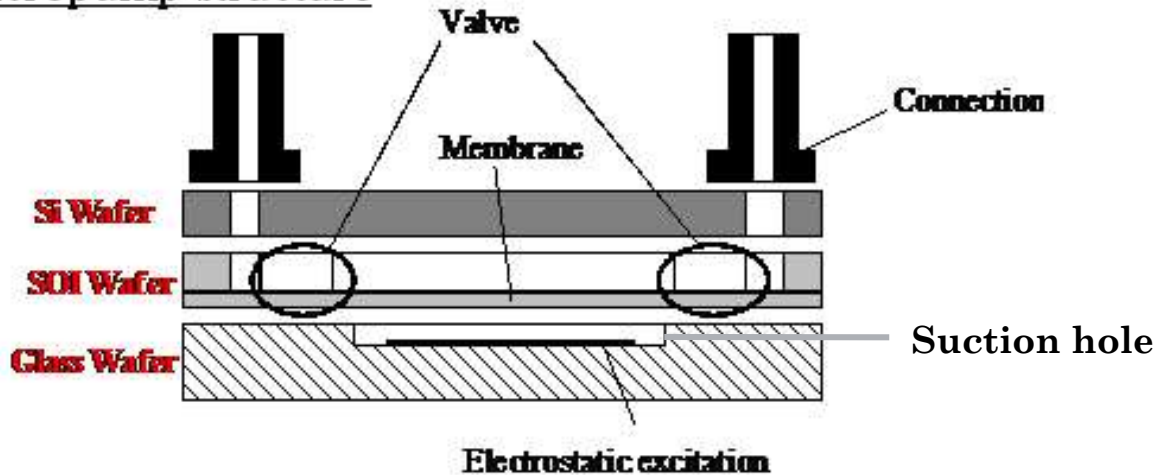
Architecture d'une micropompe électrostatique.



PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

STRUCTURE DE LA MICROPOMPE

• Micropump structure



Architecture d'une micropompe électrostatique.

Architecture d'une micropompe électrostatique.



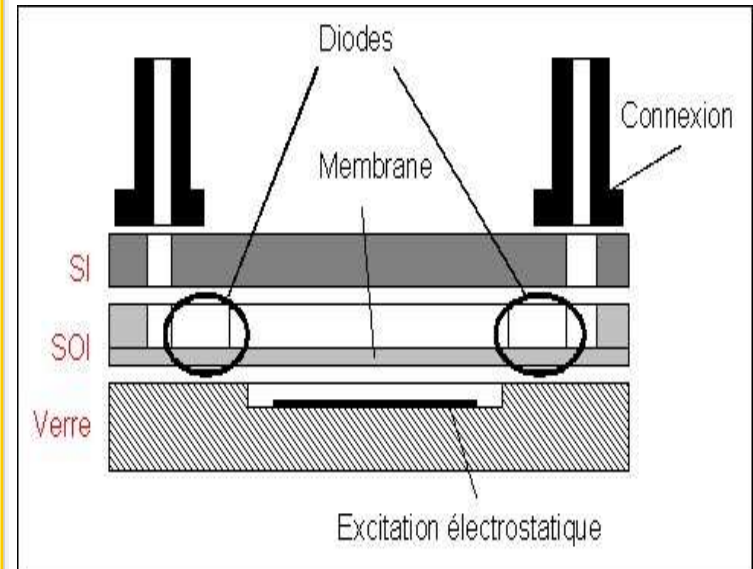
PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

ÉLÉMENTS DE DE LA MICROPOMPE

Éléments constitutifs

La réalisation de la micropompe repose sur l'utilisation de trois plaquettes :

- ❑ Une plaquette de silicium pour la réalisation des tuyaux d'accès;
- ❑ Une plaquette de type Silicon on Insulator (SOI) avec une couche d'oxyde SiO_2 ($1\mu\text{m}$) et une couche de Si ($16\mu\text{m}$) pour la réalisation de la membrane, des diodes et de la chambre de pompage;
- ❑ Une plaquette de verre ($500\mu\text{m}$) pour la définition de l'espace membrane/électrode (gap) ainsi que l'électrode fixe.



PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

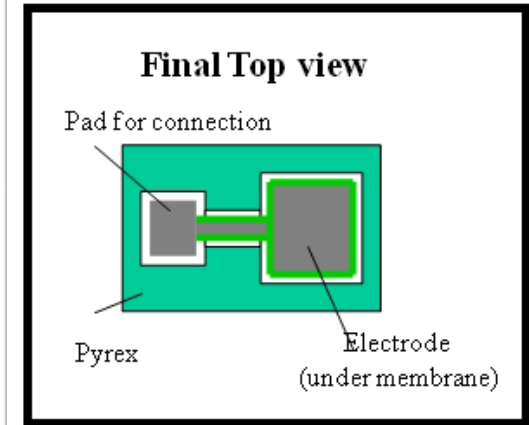
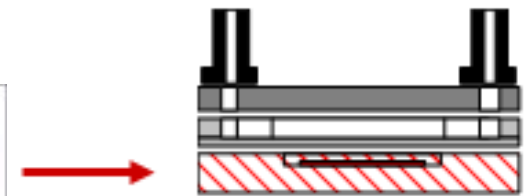
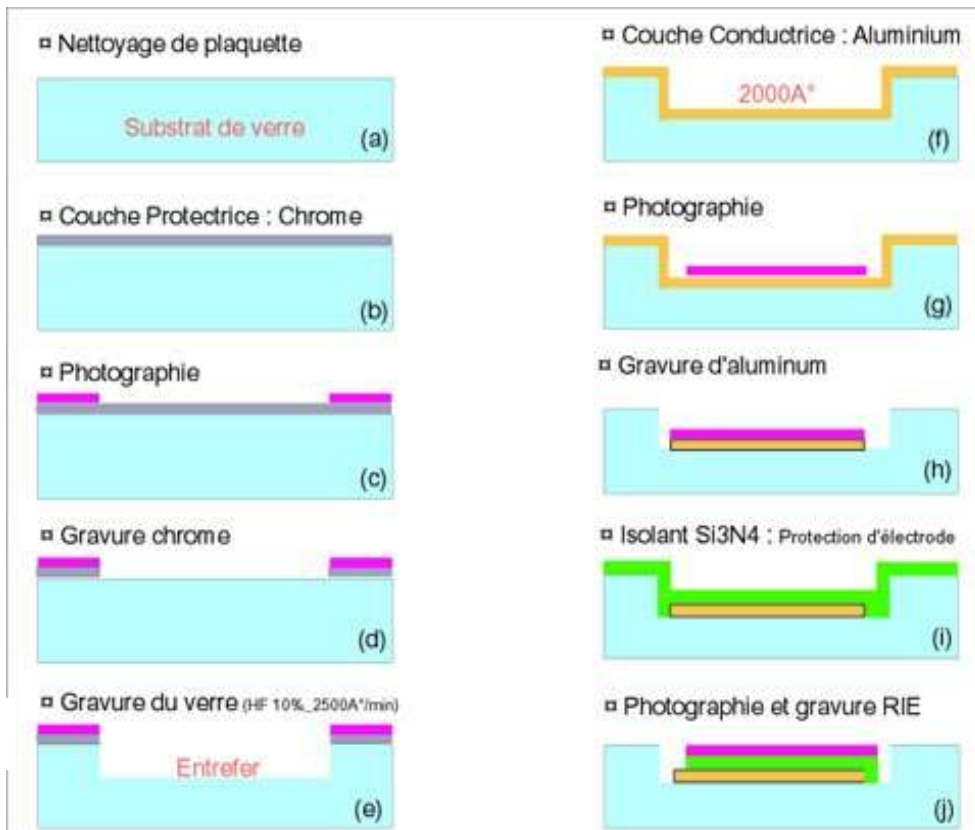
PHASE 1 DE LA RÉALISATION

Procédé de réalisation de l'électrode fixe sur le verre

Verre: 500 μm

Cr: 5000 Å

Cavité : 5 μm



vue de dessus

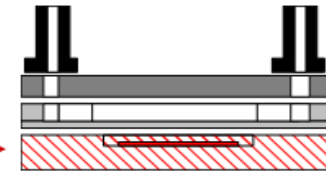


PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

PHASE 1 DE LA RÉALISATION

Pyrex wafer process :

Electrostatic actuator



• Wafer cleaning



• Protecting Layer (P.L.) for Pyrex etch :
Chrome



• Photolithography



• P.L. Etch



• Pyrex etch (H.F. 10% : 2500Å²/min) : Air GAP



• Wafer cleaning



• Conductive Layer (C.L.) for electrode :
Aluminum (2000Å²)



• Photolithography



• C.L. Etch



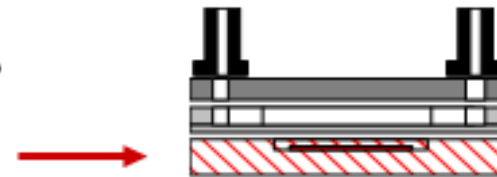
• Wafer cleaning



PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

PHASE 1 DE LA RÉALISATION (SUITE)

Electrostatic actuator



- Passive Layer (Pa.L.) for electrode protection :
Si3N4 (PECVD)



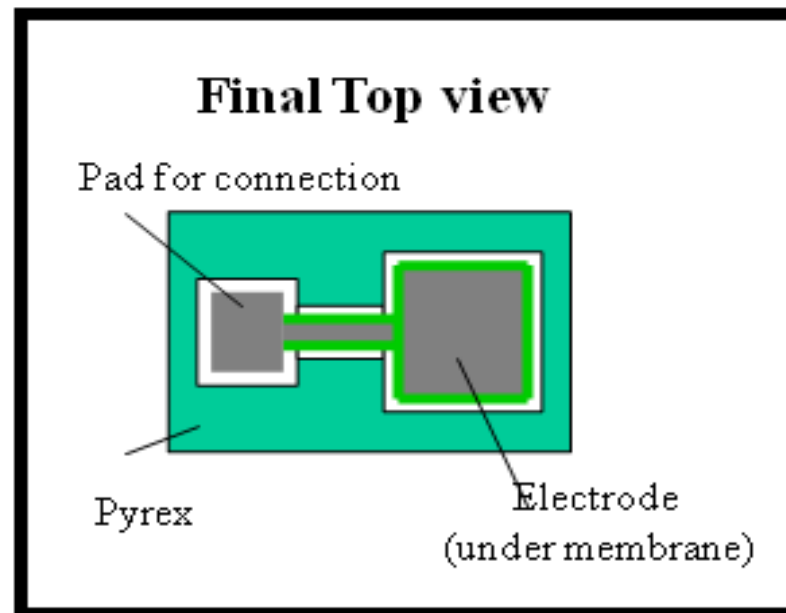
- Photolithography



- RIE Etch



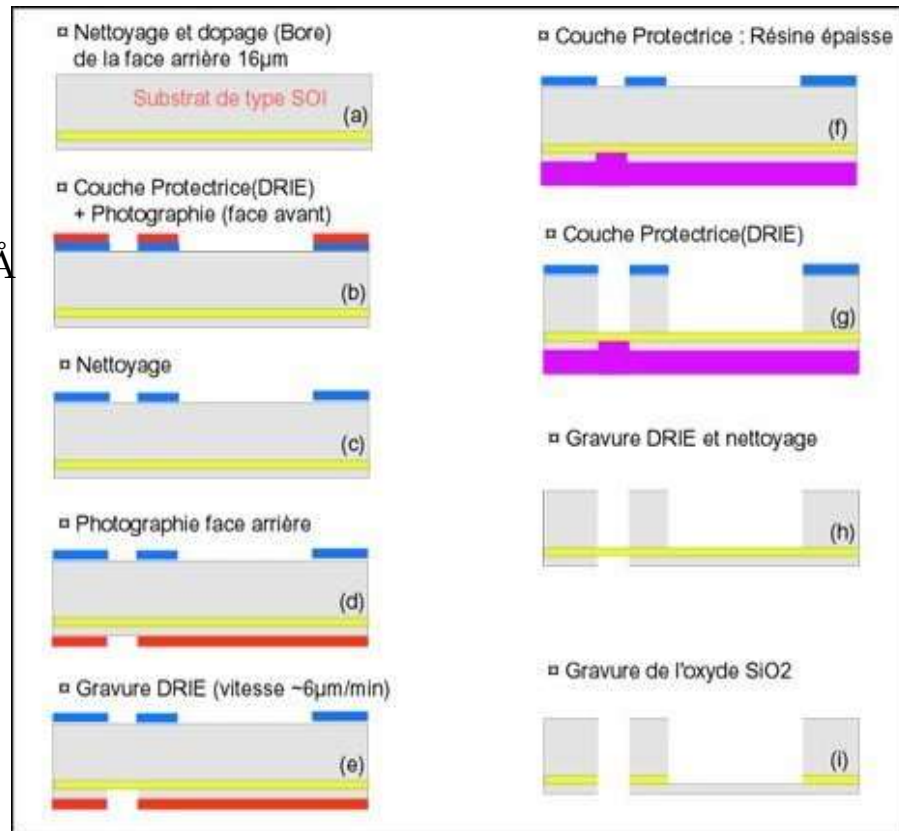
- Wafer cleaning



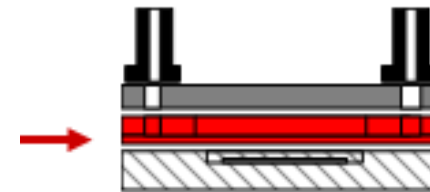
PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

PHASE 2 DE LA RÉALISATION

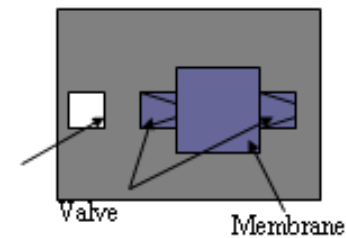
Procédé de réalisation de la membrane et des valves sur le substrat SOI



Al: 5000 Å



Final Top view



Vue de dessus

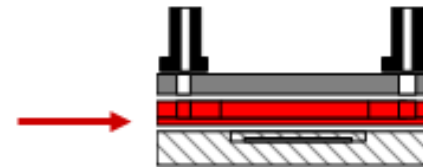


PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

PHASE 2 DE LA RÉALISATION

SOI Wafer process :

Membrane and channel



• Wafer cleaning



• Protective layer deposition for DRIE Etch



• Wafer cleaning



• Double Side Photolithography

• Back Side DRIE



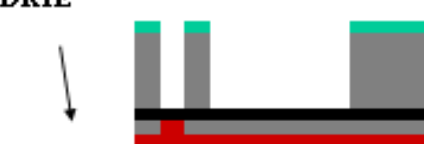
• Wafer cleaning



• Back Side Protective Layer



• DRIE



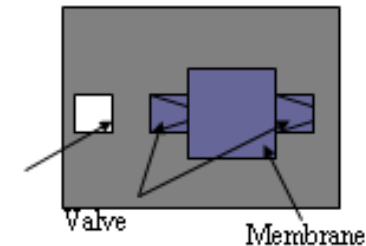
• Wafer cleaning



• SiO₂ Etch



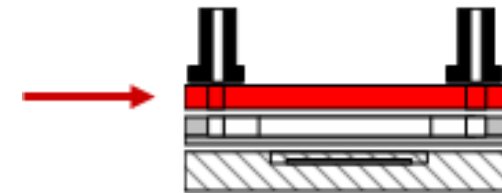
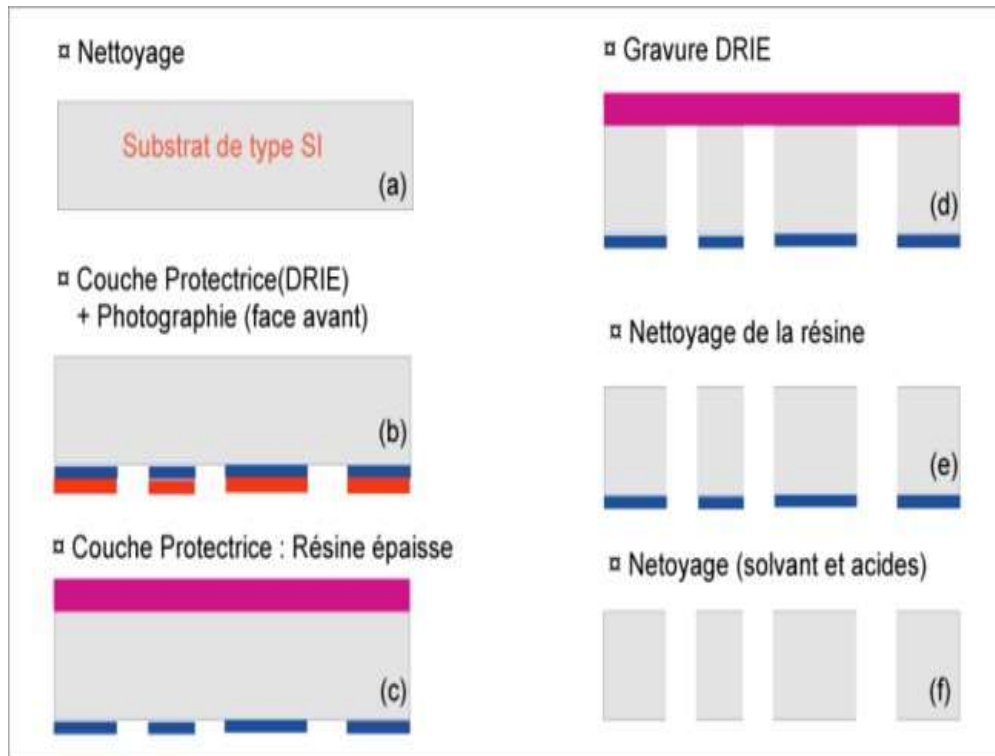
Final Top view



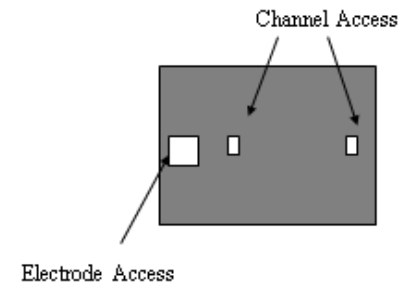
PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

PHASE 3 DE LA RÉALISATION

Procédé de fabrication des trous d'accès aux électrodes et les canaux d'entrée et de sortie du fluide.



Final Top view



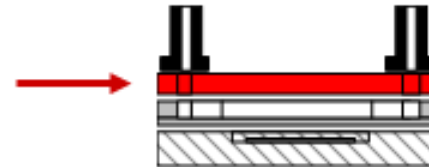
Vue de dessus



PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE

PHASE 3 DE LA RÉALISATION

Si Wafer process : Cover and electrode acces



• Wafer cleaning + Protect. Layer



• Photolithography



• Front Side Protecting Layer



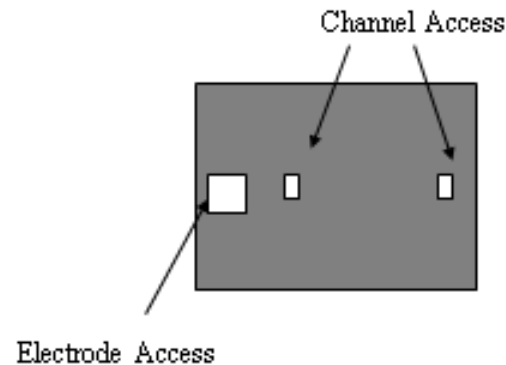
• DRIE



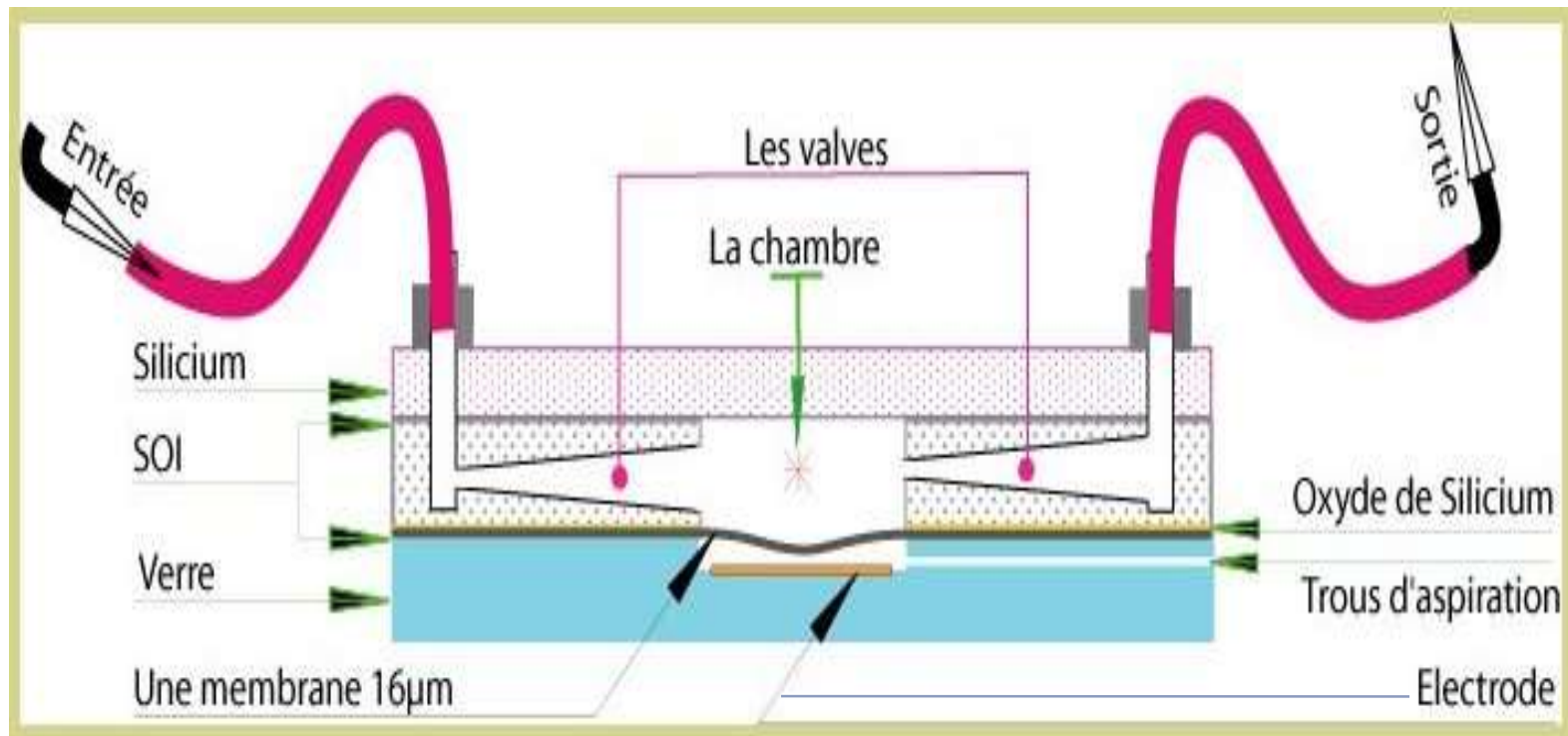
• Wafer cleaning



Final Top view



PROCÉDÉ DE RÉALISATION D'UNE MICROPOMPE PHASE 4 DE LA RÉALISATION





Merci pour
votre attention



