

# TECHNOLOGIE MICROELECTRONIQUE

Par Professeur CHABANE SARI Nasr-Eddine

La technologie microélectronique est une discipline qui se place au centre d'un certain nombre d'activités de la microélectronique en général.

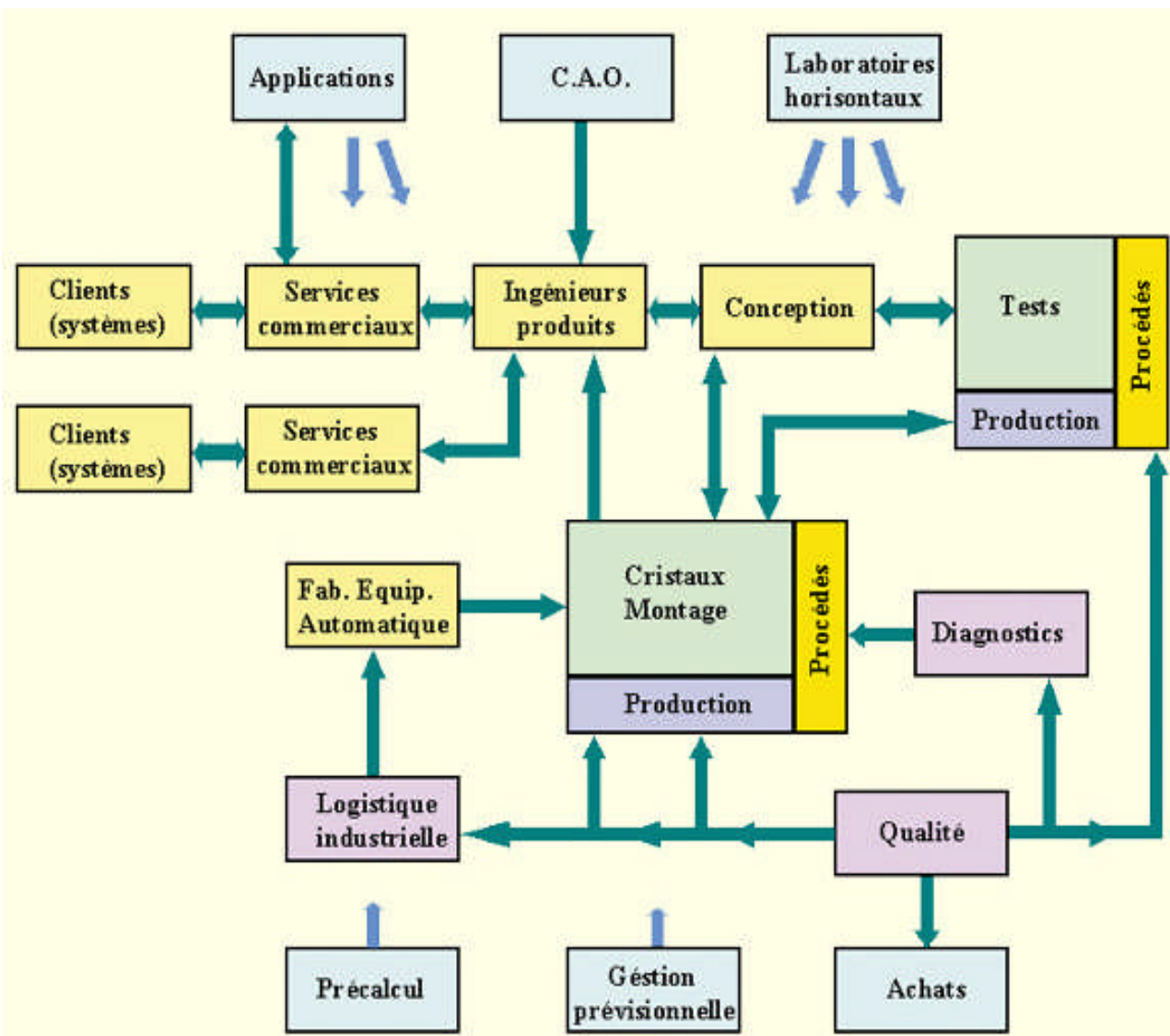
Ces activités sont très diverses couvrant aussi bien des aspects techniques que commerciaux.

Les différents domaines concernés sont plus particulièrement :

- \* la production,
- \* les procédés technologiques,
- \* les tests de production et de procédés,
- \* la conception assistée par ordinateur facilitant la création de nouveaux produits et nouveaux circuits. Elle couvre aussi bien les aspects technologiques, électriques et logiques que fonctionnels,
- \* les équipements - dans ce cas la technologie microélectronique constitue une interface entre le système (ou l'équipement) et le concepteur. En effet, le produit doit être compatible avec la technologie de réalisation,
- \* la qualité.

En pratique tous ces domaines sont très interdépendants. La figure 1, représentant les différents métiers des semi-conducteurs, permet de comprendre les différentes liaisons existant entre les technologues travaillant sur un procédé et l'environnement.

Cela veut aussi dire que cet environnement doit aussi pouvoir dialoguer avec un technologue



# Procédés technologiques : étapes et filière

Les étapes que nous étudions dans ce cours permettent de faire évoluer la matière depuis son état naturel et désordonné (le sable) vers une structure de grande complexité et la mieux ordonnée possible.

- Les principales étapes qui seront abordées dans la suite sont :
  - \* la purification du silicium,
  - \* la fabrication du cristal,
  - \* la fabrication des plaquettes,
  - \* l'épitaxie,
  - \* les procédés de dopage : diffusion et implantation de dopants,
  - \* l'oxydation : cette étape est une spécificité du matériau silicium,



- \* les dépôts :
  - dépôt de matériaux semi-conducteurs
  - dépôt d'isolants
  - dépôt de conducteurs,
- \* la gravure :
  - gravure chimique
  - gravure sèche,
- \* la photolithographie.

On appellera "**filière technologique**" cet ensemble d'étapes dont les paramètres et la succession auront été établis par un industriel et qu'il mettra en œuvre pour fabriquer plusieurs types de composants.

C'est la complexité d'un procédé complet qui peut contenir plus de 400 étapes élémentaires qui impose cette démarche.

Ceci explique aussi la contrainte pour un industriel de rester dans sa filière, c'est-à-dire de modifier le moins possible les séquences ou les étapes parfaitement mises au point.

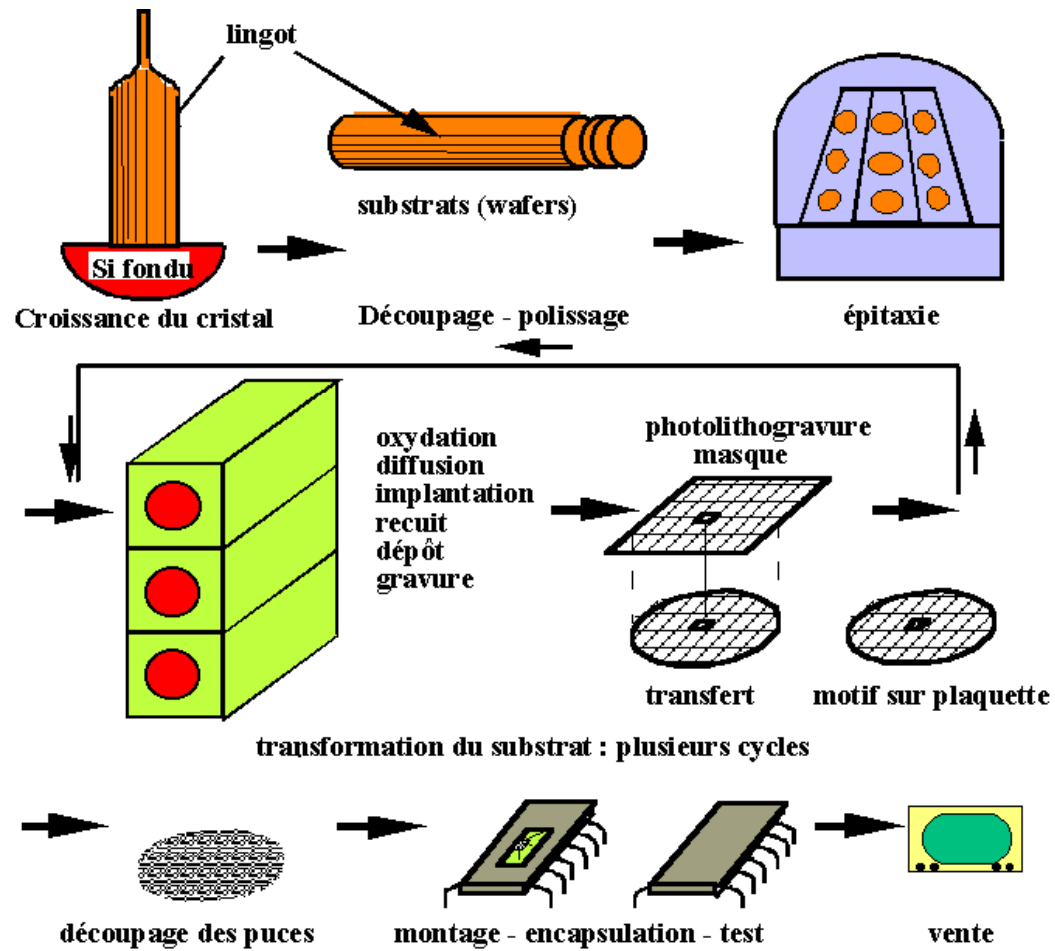
Une filière technologique est donc associée à la réalisation d'un type de circuit intégré.

Elle correspond à un choix précis d'étapes technologiques élémentaires avec une séquence bien établie.

Nous verrons plusieurs exemples de filières technologiques : NMOS, CMOS, bipolaire, BiCMOS, etc..., correspondant à des types de composants particuliers mais qui sont aussi spécifiques d'un fabricant.

Le **cycle complet de fabrication** peut être schématisé comme représenté sur la figure 2.

On remarque qu'à partir de la matière, on fabrique successivement un lingot, des plaquettes qui subissent un grand nombre d'étapes élémentaires.



# Sources du Silicium

Le silicium existe en grande quantité à la surface du globe terrestre.

C'est le deuxième élément le plus fréquent de la croûte terrestre ; O<sub>2</sub> (46%), Si (28%), Al (8%).

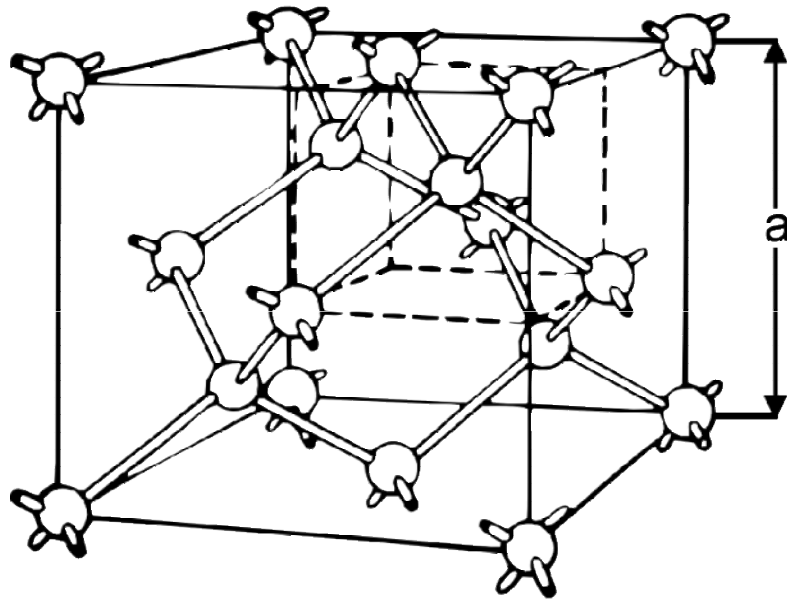
Sa température de fusion est de 1415°C, qui est donc assez élevée, et son affinité chimique (au sens stabilité des éléments chimiques qui le composent) est forte à haute température.



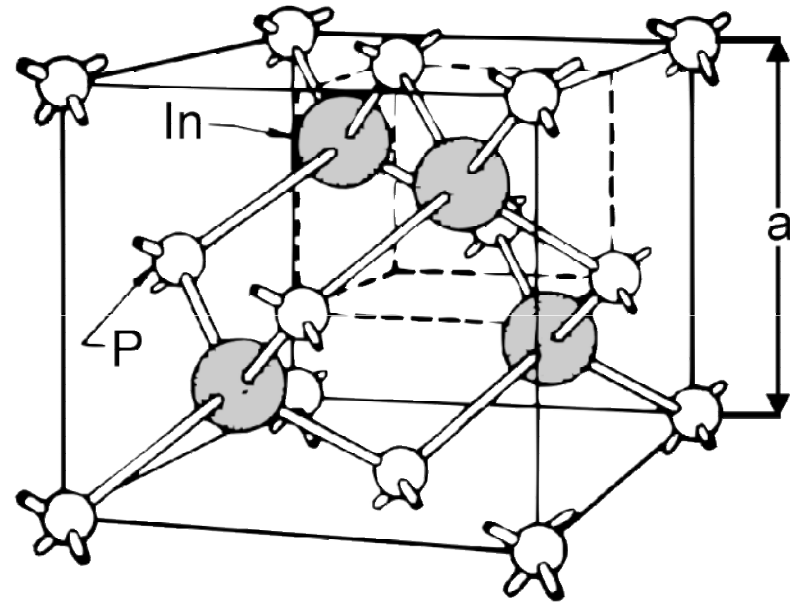
Le silicium cristallise dans une structure zinc-blende tétraédrique (ou cubique face centrée avec motif à deux atomes décalés d'un quart suivant la première diagonale) identique à celle du diamant mais avec une distance interatomique légèrement plus élevée (5.43Å).

C'est donc un matériau avec une bonne cohésion et donc une bonne stabilité thermique

La plupart des matériaux III-V cristallisent dans la structure sphalérite dite "Zinc Blende" présentée sur la figure ci-après. Cette structure, qui s'apparente à celle du diamant (C, Ge, Si, etc.), est constituée de deux sous-réseaux cubique face centrée (cfc), l'un d'éléments III et l'autre d'éléments V, décalés l'un par rapport à l'autre du quart de la diagonale principale, c'est-à-dire de  $a\sqrt{3}/4$  [111], où  $a$  représente le paramètre de maille du matériau.



Diamant  
(C, Ge, Si, etc.)



Zinc Blende  
(GaAs, InP, etc.)

Les sources naturelles sont essentiellement les silicates (sable, etc...) mais aussi zircon, jade (Le **jade** est une pierre très dure et tenace employée en ornementation et en joaillerie), mica, quartz, donc du SiO<sub>2</sub> sous diverses formes et plus ou moins de contaminants (qui lui donnent des couleurs différentes).

Ainsi, le silicium existe essentiellement sous forme oxydée et nécessite d'une part d'être réduit et d'autre part d'être purifié afin d'obtenir un matériau dit de qualité électronique ou EGS (**E**lectronic **G**rade **S**ilicon). Le problème est que la silice n'est pas réduite simplement par l'hydrogène et qu'il faut donc trouver une technique de réduction, notamment par le carbone à très haute température.

Pureté chimique requise

La qualité électronique ou microélectronique est en fait difficile à obtenir et nécessite une succession importante d'étapes de purification.

Il faut se rappeler que toute la théorie effectuée sur les dispositifs à semi-conducteur est basée sur un cristal parfait ou quasi-parfait.

La notion de dopage tient compte du fait que l'on peut maîtriser la concentration d'atomes dopants au niveau de  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$ .

Bien que ce chiffre puisse paraître grand il est en fait très faible par rapport au nombre d'atomes par unité de volume du réseau cristallin.



La démarche va donc consister dans un premier temps à obtenir du silicium de qualité dite métallurgique (**Metallurgic Grade Silicon**), puis de purifier le matériau pour atteindre la pureté requise ou électronique (**Electronic Grade Silicon**).

Réduction de la silice

La première étape consiste à effectuer une électrolyse dans un four à arc pour atteindre des températures suffisantes permettant de fondre la silice.

Le  $\text{SiO}_2$  est mélangé à du carbone (charbon).

La réaction bilan est la suivante, sachant qu'en réalité elle résulte d'un grand nombre de réactions chimiques intermédiaires :



Après cette opération, le silicium obtenu a une pureté de 98 %. Il faut donc le purifier encore de plusieurs ordres de grandeur pour obtenir du matériau pour la microélectronique.

# Purification du silicium

Il s'agit, en partant du silicium métallurgique de faire une purification chimique.

Une des méthodes utilisées consiste à faire une distillation à partir d'un produit, liquide à température ambiante, qui contient le silicium.

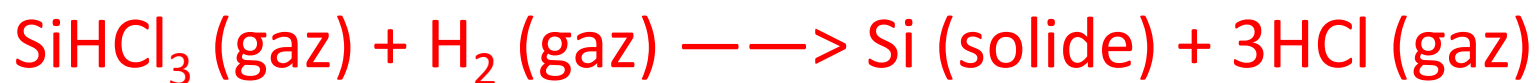
De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium basés sur le trichlorosilane ( $\text{HSiCl}_3$ ), c'est le cas de Rhône-Poulenc, Westinghouse, Texas, Saint Gobain.



L'exemple choisi concerne la fabrication du trichlorosilane par pulvérisation du silicium réagissant avec le gaz de chlorure d'hydrogène (HCl ou acide chlorhydrique) suivant la réaction :



Ce trichlorosilane purifié est ensuite réduit pour redonner du silicium dans un réacteur présenté figure 5. La réaction chimique bilan est la suivante :



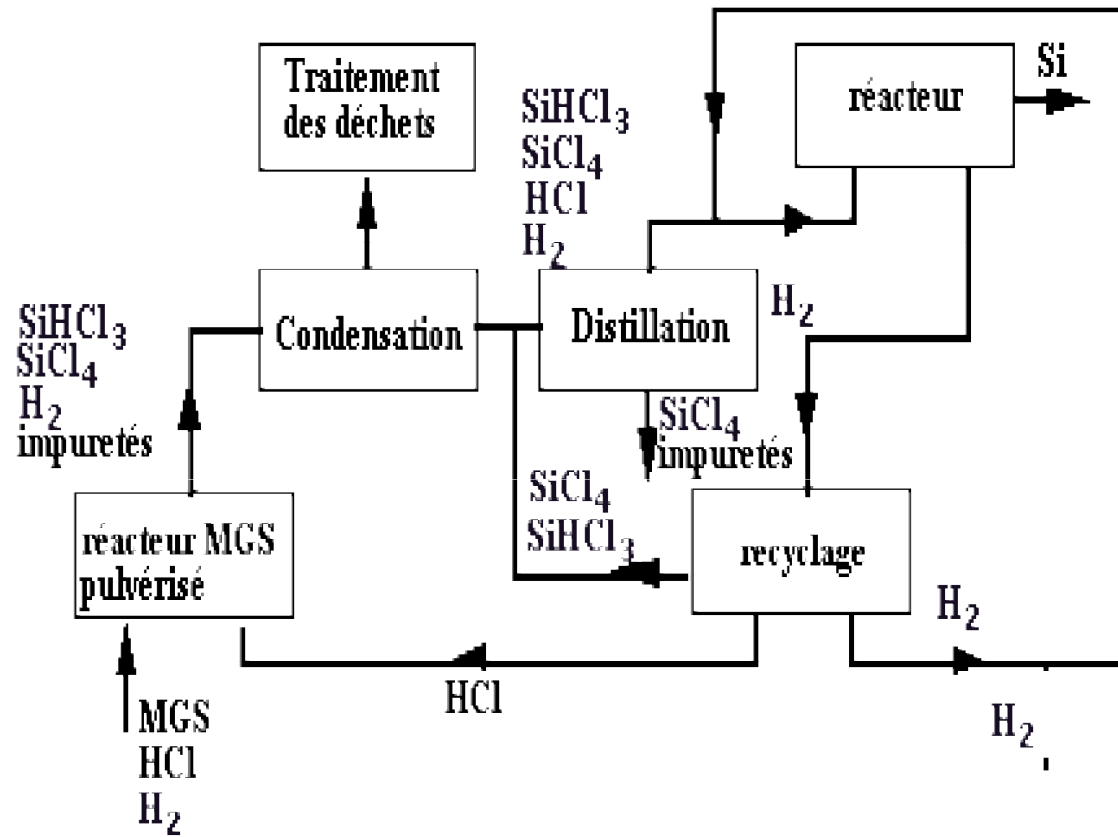


Figure 4 : Distillation du composé de silicium chloré. Après distillation, le réacteur permet d'obtenir le dépôt de silicium.

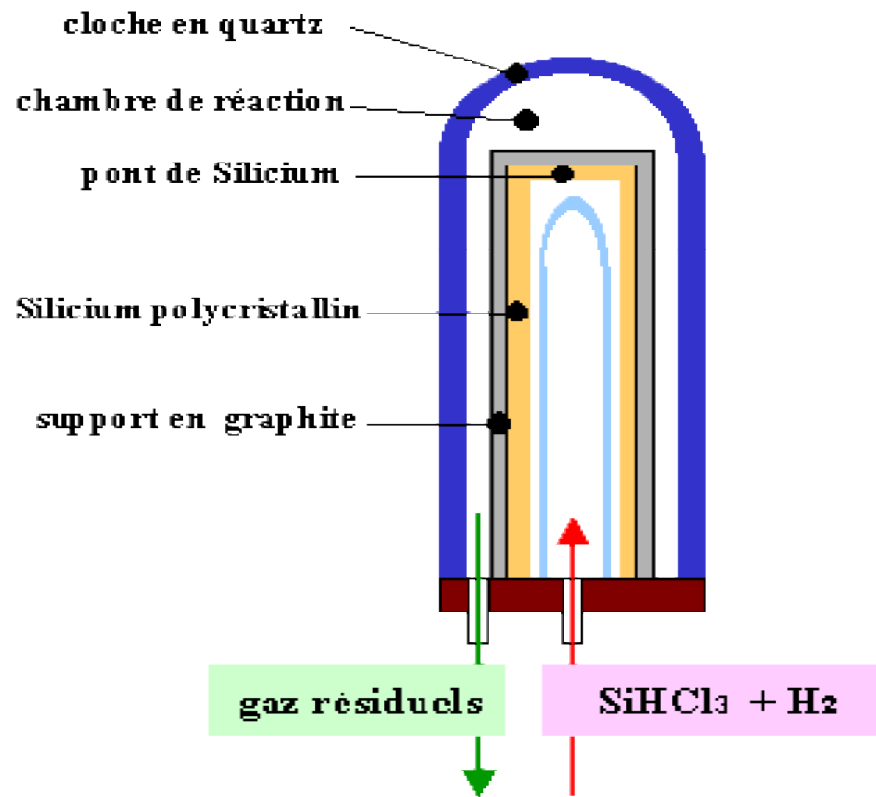


Figure 5 : Schéma d'un réacteur CVD pour la production de silicium de qualité électronique à partir de  $\text{SiHCl}_3$  (d'après L. Crossman et J. Baker [1]).

Le procédé est dans ce cas identique à un dépôt chimique en phase vapeur (CVD).

A partir d'un germe dans de très longs tubes, on dépose progressivement le silicium. On obtient des lingots en structure polycristalline jusqu'à 20 cm de diamètre. La pureté obtenue est de l'ordre du ppm, soit des concentrations équivalentes de l'ordre de  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ .

## Définition:

Un **polycristal** ou **matériau polycristallin** est un matériau solide constitué d'une multitude de petits cristaux appelés [cristallites](#) de taille et d'orientation variées, par opposition à un matériau monocristallin constitué d'un seul et unique cristal.



Image d'[acier électrique](#) (sans revêtement)  
montrant une structure polycristalline

Le tableau suivant donne quelques exemples de concentrations résiduelles après purifications des principales impuretés ou éléments dopants. Pour la plupart, elles sont suffisamment faibles pour pouvoir utiliser le matériau en microélectronique à condition de fabriquer du cristal. C'est à partir de ce silicium polycristallin que l'on doit fabriquer le monocristal.



impureté	MGS (ppm)	EGS (ppm)
Al	1570	-
B	44	<0.001
Fe	2070	4
P	28	<0.002
Sb	-	0.001
Au	-	0.00007

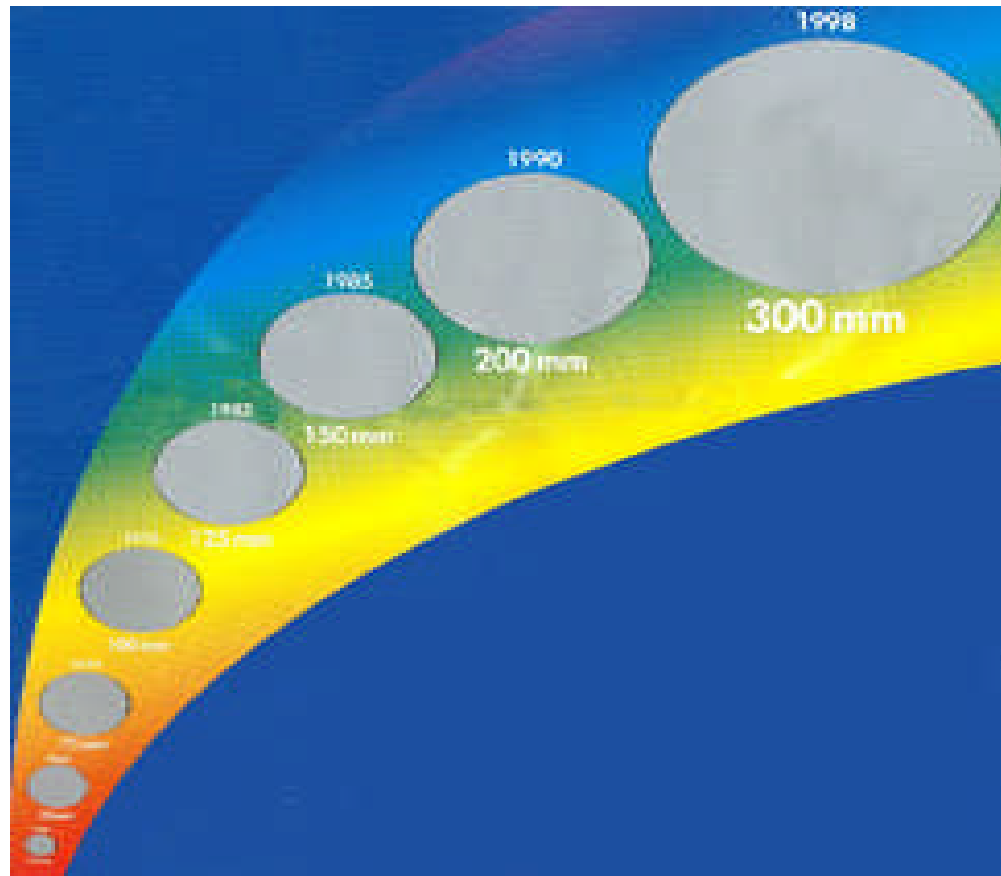
Comparaison de la concentration relative de quelques impuretés ou dopants dans le silicium avant et après purification (ppm : partie par million) (d'après S.M. Sze[2]).

# La fabrication des plaquettes

La fabrication des plaquettes à partir du silicium **purifié** nécessite un grand nombre d'étapes que nous allons détailler.

Il faudra tout d'abord réaliser un cristal, sous forme de lingot qui sera ensuite découpé en rondelles pour constituer les plaquettes.

Nous allons voir également qu'un grand nombre de précautions est nécessaire.



Evolution de la taille des substrats de silicium depuis le début des circuits intégrés

a) charge de polysilicium le plus pur possible :

Le silicium purifié est utilisé pour constituer la charge à introduire dans le réacteur de croissance.

b) préparation de la charge à fondre et à transformer en lingot:

Cette charge peut être dopée si l'on désire des plaquettes dopées (substrats dopés dans les procédés). On rajoute ainsi, en proportion calculée, la quantité relative de dopant dans l'ensemble de la charge

# Méthodes de tirage et croissance du cristal

méthode de tirage "Czochralski"



La charge, mise dans un creuset en graphite, est fondue ( $T > 1415^{\circ}\text{C}$ ).

A partir d'un germe, on effectue un tirage progressif du lingot moyennant des conditions très précises (températures du creuset de charge fondue, de l'enceinte, gradient de température, transfert de chaleur, vitesse de tirage du germe, etc...). On obtient des lingots de différents diamètres suivant la vitesse de tirage.

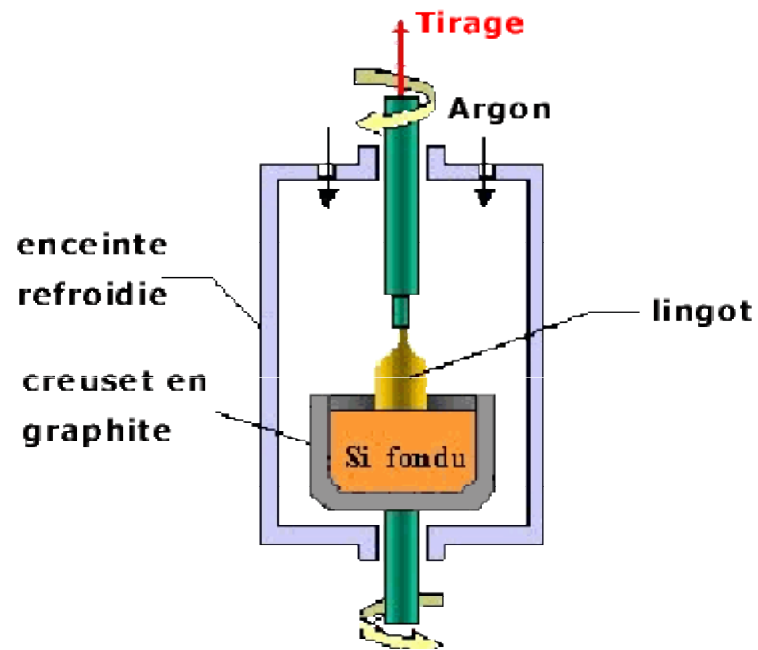


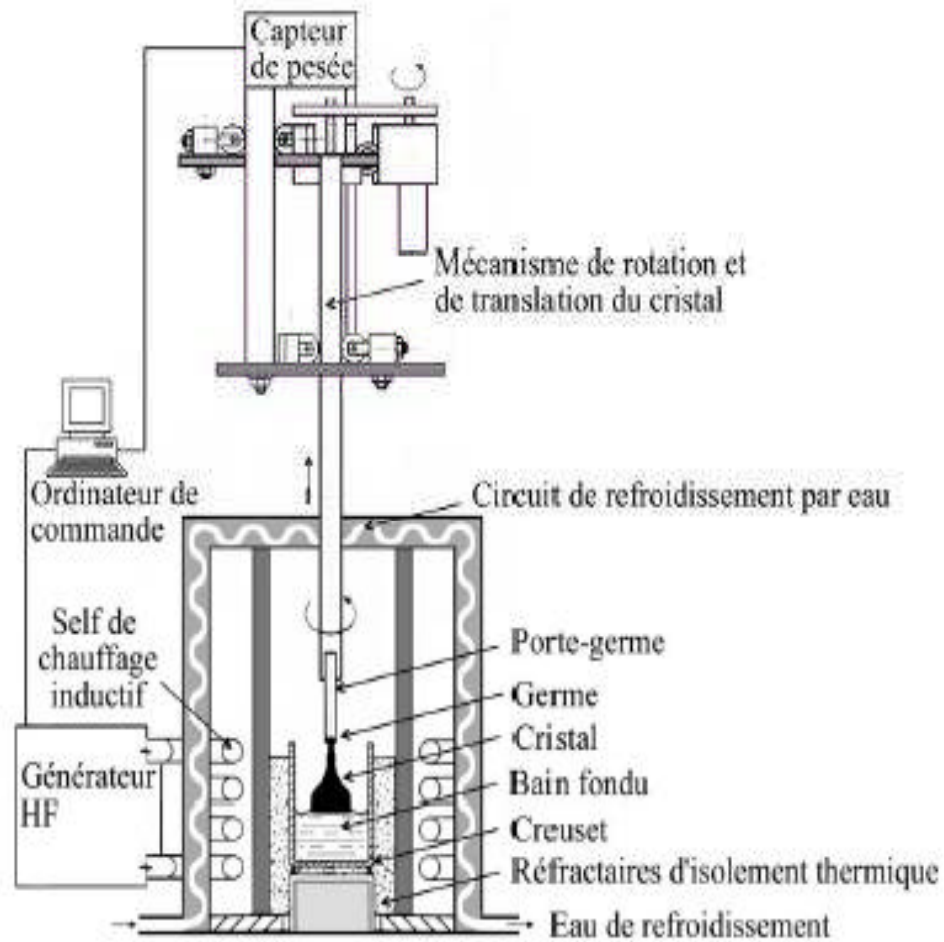
Figure 8 : Tirage d'un lingot par la technique Czochralski. Le diamètre du lingot est lié aux paramètres physiques en cours de tirage.

## REMARQUE:

Notons que la différence de vitesse de diffusion des espèces entre la phase liquide et la phase solide entraîne une modification de la concentration relative des espèces le long du lingot.

C'est en particulier vrai pour la concentration de dopant qui implique que la résistivité ne sera pas constante le long du lingot, toute chose égale par ailleurs.





Principe de la méthode de tirage Czochralski

Technique de tirage par fusion de zone (Fz)

Une autre technique peut être employée pour réaliser des lingots de grande dimension.

Elle utilise un lingot de silicium polycristallin obtenu dans le réacteur de réduction du trichlorosilane.

La cristallisation est obtenue en pilotant la croissance à partir d'un germe fixé en extrémité de lingot par le déplacement d'une zone fondue (voir figure ).

Cette zone est chauffée en limite de fusion du silicium grâce à l'alimentation d'une bobine parcourue par un courant haute fréquence (courant de Foucault).



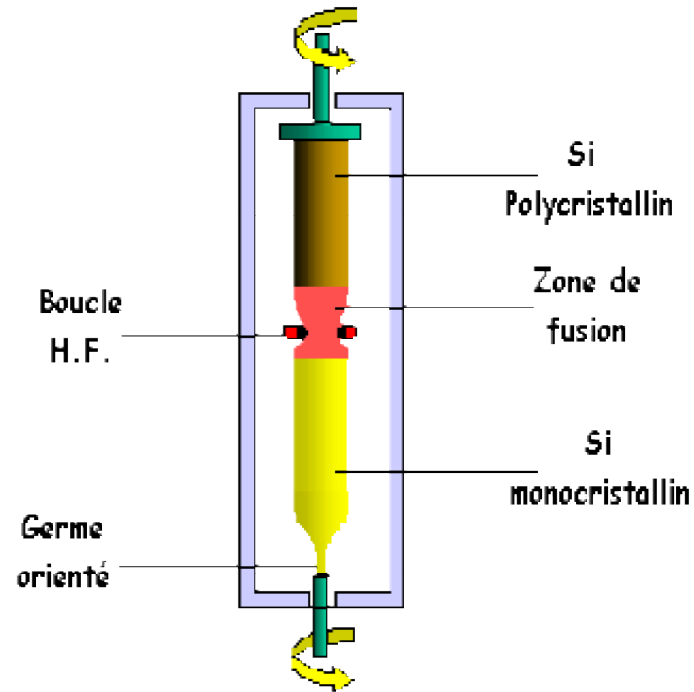


Figure 9 : Cristallisation du lingot et purification par la méthode de fusion de zone. Au cours du déplacement de la zone fondue, les impuretés dopantes ou non dopantes se redistribuent dans le lingot

Cette méthode est aussi utilisée pour purifier un lingot ; on exploite en effet les phénomènes de diffusion des impuretés à haute température dans un solide.

Dans ce cas, on peut monter jusqu'à 3 bobines autour du lingot qui sont parcourues par un courant HF.

C'est un moyen pour obtenir des lingots de faible dopage résiduel notamment nécessaires pour la réalisation de composants de puissance (zones quasi-intrinsèques permettant la tenue en tension).

# La technique de tirage Bridgman

Une autre technique peut être utilisée pour le tirage des lingots.

Dans le cas de composés semi-conducteurs III-V, on peut réaliser le lingot dans un bac parallélépipédique dont le fond est arrondi. La cristallisation s'effectue progressivement depuis une extrémité ; c'est la méthode dite "Bridgman« (voir figure).

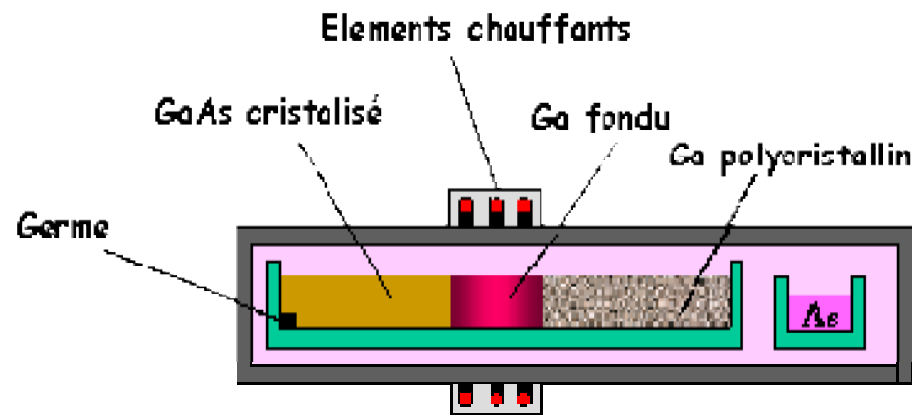
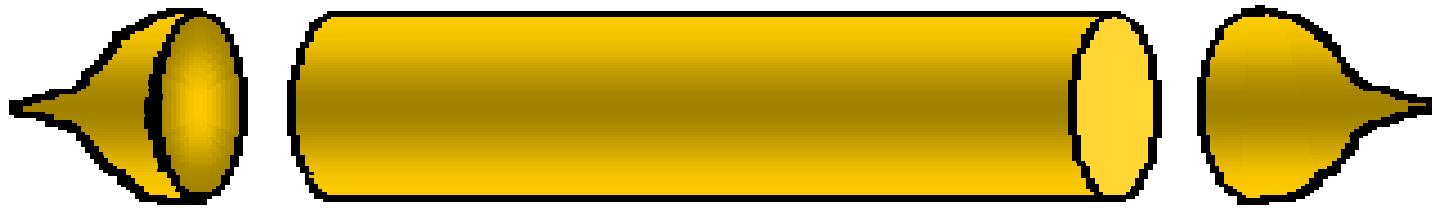


Figure 10 : Tirage d'un lingot par la méthode Bridgman. Cette technique est plus spécialement utilisée pour les lingots de composés III-V tel que le GaAs.

## équeutage du lingot :

Cette opération consiste à éliminer les extrémités du lingot soit mal cristallisées soit riches en impuretés (surtout si la technique de croissance utilisée est la fusion de zones ).





## contrôle de résistivités sur les extrémités du lingot :

En raison de la variation de la concentration d'impuretés lors tirage du lingot, la résistivité finale varie en fonction de la position.

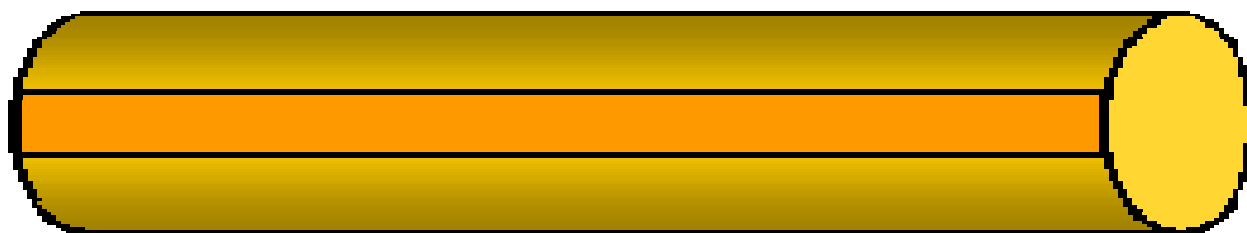
Une vérification des spécifications (gamme de variation) est nécessaire.

La technique employée est du type mesure quatre pointes.

## repérage cristallographique du lingot par méthode de diffraction des rayons X :

Il sera nécessaire de connaître les orientations cristallographiques afin d'effectuer en fin de fabrication la découpe suivant les axes cristallographiques.

Après repérage, on crée un méplat ( ou des méplats) servant de référence.



## polissage cylindrique :

Lors du tirage, le diamètre du lingot varie légèrement ce qui constitue des ondulations à sa surface. Pour obtenir des plaquettes de même diamètre un polissage cylindrique est nécessaire.

## polissage d'un méplat de référence cristallographique et géométrique :

Cette référence servira au cours du procédé (orientation des zones de conduction par rapport aux axes du cristal, repérage des motifs lors de la photolithographie, axes cristallographiques pour la découpe des puces). Par ailleurs, suivant le type de dopage de substrat et son orientation cristallographique, on fera des repères supplémentaires. Notons que sur les plaquettes de 200 mm, seul subsiste un repérage cristallographique par une petite encoche ; la nature du substrat est indiquée dans le marquage (effectué par laser).

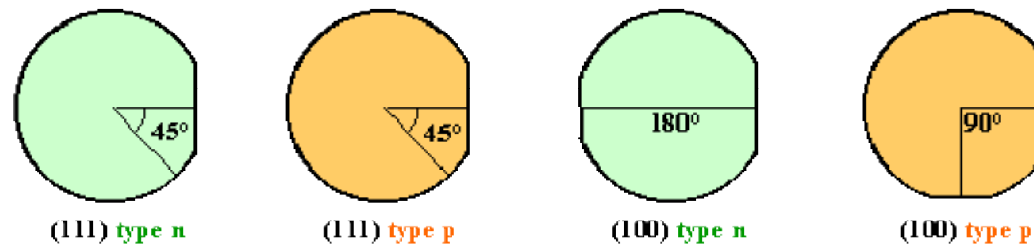
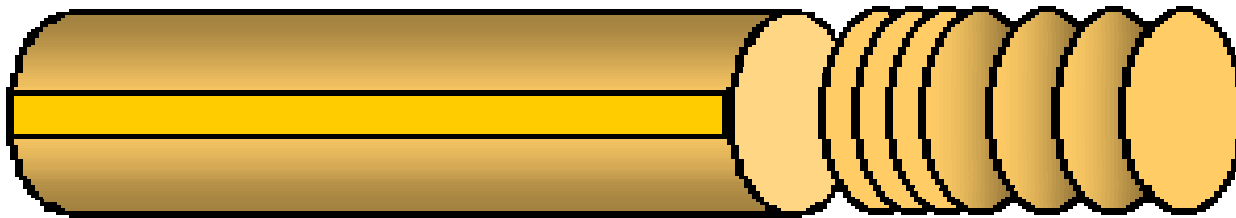


Figure 11 : Méplats d'identification des plaquettes. On peut facilement repérer les types n des types p et leurs orientations

## découpage des plaquettes :

Ce découpage s'effectue à l'aide d'une scie diamantée de 400  $\mu\text{m}$  d'épaisseur environ pour les lingots de diamètre important.

Des techniques de coupes par scie à fil commencent à être utilisées chez de nombreux fabricants. Dans ce dernier cas, les pertes de coupes sont plus faibles.





## REMARQUE:

Compte tenu de l'équeutage et du polissage 50% à 60% du lingot est éliminé.

En pratique, les plaquettes de dimension supérieure à 150 mm font au moins 500  $\mu\text{m}$  d'épaisseur en cours de procédé afin d'éviter une fragilité mécanique. Cette épaisseur est réduite à 250 - 300  $\mu\text{m}$  avant découpage (étape d'amincissement) afin de faciliter les échanges thermiques (voire électriques) avec le support de puce dans les boitiers.

## traitement thermique :

Le sciage crée des contraintes mécaniques dans le cristal. Il faut relaxer le cristal par une montée en température (recuit) à des températures de l'ordre de 600°C à 700°C. A ces températures, les énergies propres des atomes sont suffisantes pour leur permettre de se repositionner dans les sites cristallins.

Ce traitement thermique présente aussi l'avantage de diminuer l'effet des atomes oxygène (type donneur) ainsi que de stabiliser la résistivité.

## tri des plaquettes en fonction des épaisseurs :

Les épaisseurs après découpe pourront être sensiblement différentes. Il faut donc limiter la quantité de matière à éliminer par le polissage (le tri se fait par gamme de 10  $\mu\text{m}$  par exemple).

## enrobage des plaquettes dans une mixture d'alumine en solution - polissage :

Afin d'améliorer l'état de surface des plaquettes, ces dernières subissent un polissage à l'aide d'une mixture contenant des grains d'alumine de dimension micronique.

## nettoyage :

Cette étape consiste à éliminer les composés abrasifs et les contaminants par des solvants (acétone +trichloroéthylène) et de l'eau désionisée.

## attaque chimique des plaquettes :

Lors des différentes étapes, il s'est formé, en surface des plaquettes, un oxyde natif contenant des impuretés.

Ces impuretés sont soit métalliques et sont éliminées par une solution acide, soit organiques et éliminées par une solution basique :

- solutions acides :  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{CH}_3\text{COOH}$ ,
- solutions basiques :  $\text{KOH}$ .

On n'utilise pas de soude ( $\text{NaOH}$ ) car le sodium est un polluant violent pour les oxydes, plus particulièrement pour les oxydes de grille des transistors MOS.

L'oxyde natif est finalement attaqué par une solution d'acide fluorhydrique ( $\text{HF}$ ). On obtient alors une surface chimiquement neutre avant un polissage "miroir".

## endommagement de la face arrière :

La partie utile de la plaquette se trouve très près de la surface supérieure. Il va s'agir de rendre cette zone la plus pure possible aussi bien au niveau des impuretés (atomes étrangers) que des défauts cristallographiques ou structuraux (macles, dislocations, etc...).

On va alors créer des défauts sur la face arrière par sablage ou bombardement LASER, ce qui provoque un dépolissage.

Lors des traitements thermiques ultérieurs, les impuretés du côté de la face active vont migrer dans le substrat et être piégées par des états plus favorables énergiquement créés par les dommages de la face arrière. On appelle ce phénomène, l'effet "getter".

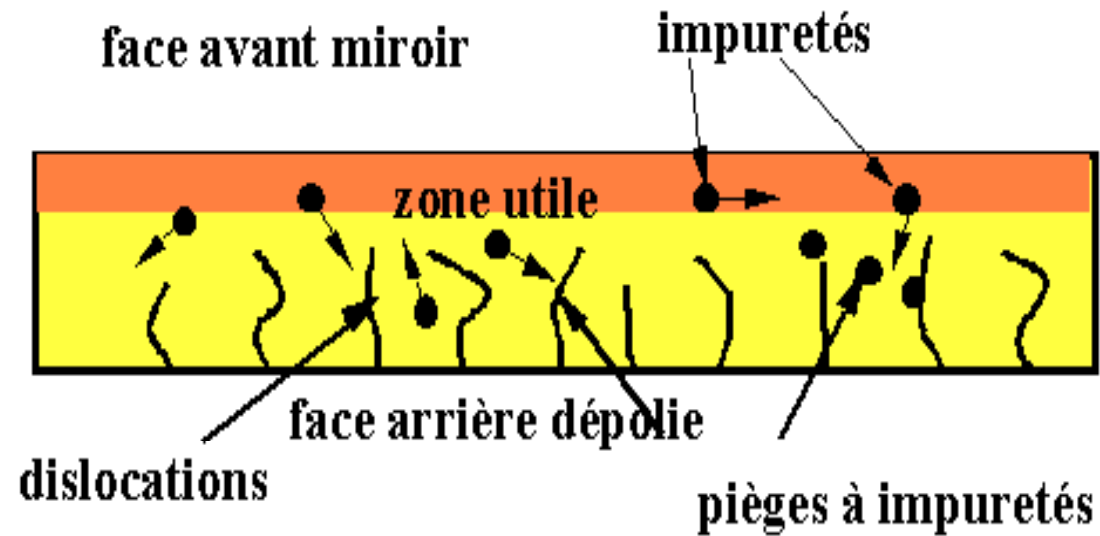


Figure 12 : La face arrière est endommagée. Elle perd son aspect miroir. Cette opération permet d'améliorer la zone active très proche de la face supérieure.



## tri en fonction des épaisseurs :

Après dépolissage de la face arrière, les épaisseurs ont varié. On effectue donc un nouveau tri par gamme d'épaisseur.

## préparation au polissage final de la face active :

Les plaquettes sont montées dans des polisseuses.

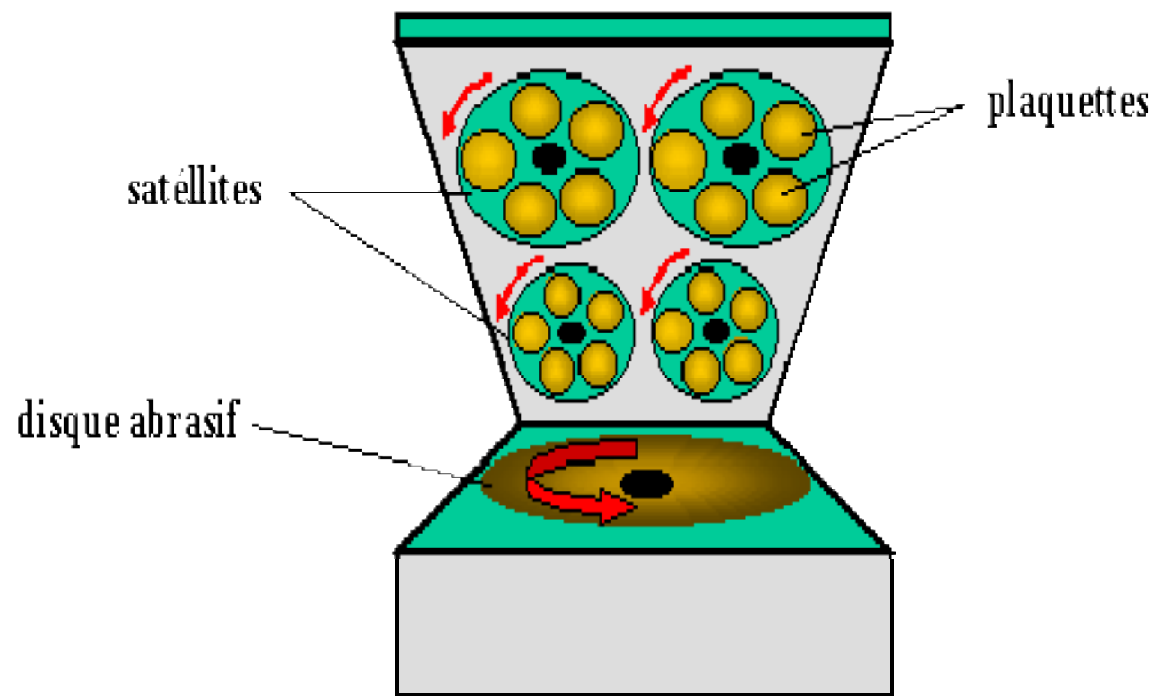


Figure 13 : Les plaquettes sont montées sur une polisseuse. Elle est constituée de satellites qui tournent sur eux-mêmes afin d'améliorer l'homogénéité de polissage des plaquettes

élimination de l'excès d'épaisseur :

25  $\mu\text{m}$  environ sont éliminés.

polissage final "miroir"

Ce polissage peut être mécanique ou mécano-chimique qui combine à la fois les effets mécaniques et chimiques. Il faut éliminer les rayures, les peaux d'orange. Cette opération est effectuée à l'aide d'une machine identique à celle de la figure 13, mais avec des disques de polissage peu agressifs et une solution abrasive à très petits grains (diamètre de 0,1 à 0,5  $\mu\text{m}$ )

### test de résistivité des plaquettes , tri final en fonction des résistivités :

Afin de sélectionner les lots pour les clients, un tri en fonction de la résistivité est effectué.

### repérage - marquage :

Un marquage de lots, lingots, date, etc.. , est réalisable à l'aide d'un faisceau laser. Cela permet de suivre la plaquette tout au long des étapes de fabrication.

### nettoyage final en salle blanche :

Pour démarrer l'ensemble des étapes du procédé de fabrication des circuits intégrés, il ne faut pas de graisse, pas de poussières, etc... .  
Un nettoyage final est nécessaire.

### inspection visuelle :

C'est l'être humain qui reste à l'heure actuelle le meilleur inspecteur. Il détecte des variations de couleur, des rainures, des rayures, des poussières de dimensions inférieures au micron. Un système automatique à balayage optique sur toute la plaquette ne serait pas encore suffisamment performant. Prenons, par exemple, une surface de 10 cm x 10 cm de côtés à contrôler. Il faudra balayer cette surface par zone de mesure (ou "point" de mesure), qui sont de 0,05  $\mu\text{m}$  de côté, pour simplifier.

Un point de 0,05  $\mu\text{m}$  x 0,05  $\mu\text{m}$  nécessite au moins 1  $\mu\text{s}$  de temps de traitement (analyse spectrale par exemple). Dans ce cas, le temps total d'analyse est :

$$t_a = \left[ \frac{10^{-2}}{5 \cdot 10^{-6}} \right] * 10^{-6} = 4 \cdot 10^4 \text{ s} \approx 11 \text{ h}$$

C'est un temps énorme et donc peu réaliste. En fait, dans ce cas l'œil humain est beaucoup plus efficace car il traite l'information en parallèle grâce à des millions de cellules rétiniennes !

## test de planéité :

Ce test est important pour la lithographie. Il existe aujourd'hui des machines à tester la planéité basée sur une mesure optique (déviation d'un faisceau laser).

Après l'ensemble de ces étapes, les plaquettes sont prêtes pour subir les étapes de fabrication des circuits intégrés (ou des composants discrets).

# L' EPITAXIE



## Définition :

L'épitaixie est une étape technologique consistant à faire croître du cristal sur du cristal.

La technique va donc consister à utiliser le substrat comme germe cristallin de croissance et à faire croître la couche par un apport d'éléments constituant la nouvelle couche.

La couche épitaixiée peut être dopée ou non dopée.

On parlera, dans le cas où :

- les matériaux sont identiques, **d'homoépitaxie** ;

par exemple, épitaxie d'une couche n- sur une couche n+, impliquée dans la jonction collecteur-base d'un transistor bipolaire permettant une meilleure tenue en tension de cette jonction polarisée en inverse (figure 14),

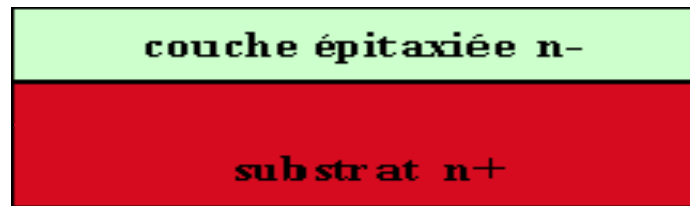
- les matériaux sont différents, **d'hétéroépitaxie** ;

par exemple la croissance d'une couche de  $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$   
sur une couche de GaAs ;

cet assemblage permet la fabrication de super-  
réseaux ou de couches à forte mobilité destinées aux  
transistors HEMT (High Electron Mobility Transistor).

## Remarque

Dans ce dernier cas, la croissance ne sera possible que s'il y a accord de maille, c'est-à-dire même réseau cristallin et paramètres de maille très voisins (distance entre atomes peu différente pour le nouveau réseau ; quelque 1 à 2 % au maximum d'écart).



Exemple d'une épitaxie n- sur un substrat de type n+ ; on dira que le substrat est épitaxié.

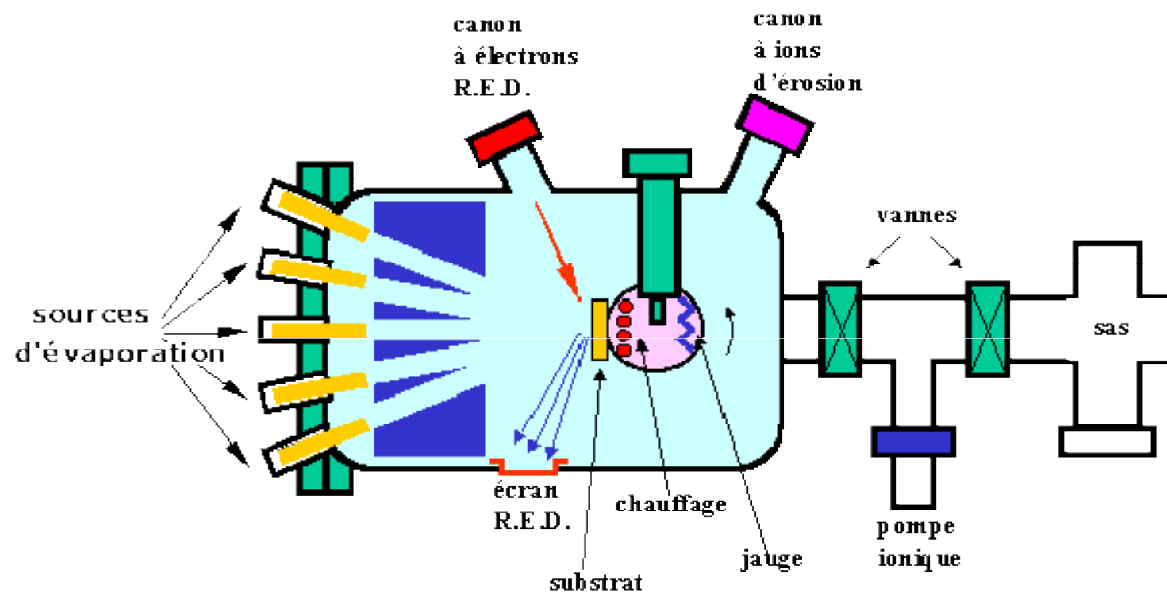
# Les méthodes expérimentales

Il existe principalement 3 types de méthodes expérimentales:

- l'épitanie par jet moléculaire, EJM ou MBE (Molecular Beam Epitaxy),
- l'épitanie en phase liquide ou LPE (Liquid Phase Epitaxy),
- l'épitanie en phase vapeur ou VPE (Vapor Phase Epitaxy).

# **L'épitaxie par jet moléculaire**





Bâti d'épitaxie par jet moléculaire, EJM, ou Molecular Beam Epitaxy, MBE

Cette technique consiste à envoyer des molécules à la surface d'un substrat dans un vide très poussé afin d'éviter tout choc ou contamination sur le parcours.

Le principe de la source est l'évaporation sous vide (cellule de Knudsen) par chauffage.

Les sources d'évaporation peuvent être de nature et de dopage différents ; pour chaque élément évaporé, il faut adapter la puissance de chauffe de cellules mais aussi du porte-substrat.

Par le contrôle des cellules d'évaporation, on crée un jet de molécules en direction du substrat.

on peut ainsi réaliser couche par couche des structures très complexes telles que les super réseaux, les diodes laser, les transistors à forte mobilité d'électron (HEMT).

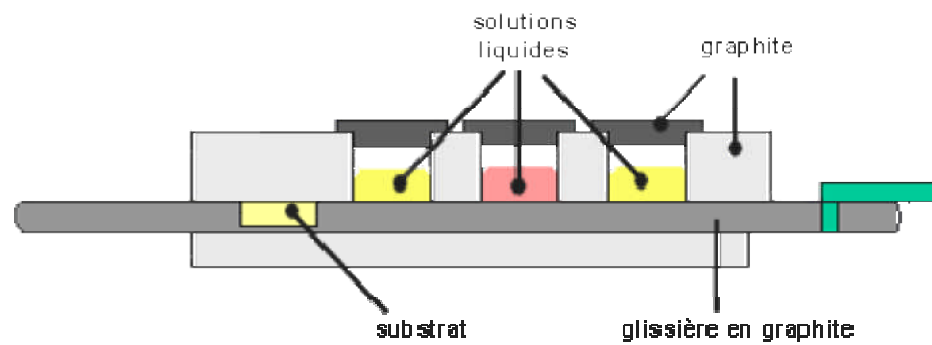
On obtient ainsi une très grande précision de croissance, des jonctions très abruptes, mais cette opération est très lente et ne concerne qu'un seul substrat à la fois.

La vitesse de croissance est de l'ordre de 1nm par minute. Cette technique est donc très coûteuse et ne concerne que des dispositifs à très forte valeur ajoutée.

Ce système ultravide,  $10^{-10}$  Torr, permet tous les contrôles et les caractérisations *in-situ* dont les principes nécessitent un vide poussé : diffraction d'électrons, spectroscopie Auger, ESCA (XPS ou UPS), diffraction des rayons X, etc...

On peut ainsi, en permanence, vérifier la cristallinité du cristal en cours de croissance.

# L'épitaxie en phase liquide



Dispositif multibain d'épitaxie en phase liquide. Les solutions peuvent être de matériau ou de dopage différents pour réaliser une hétéroépitaxie.

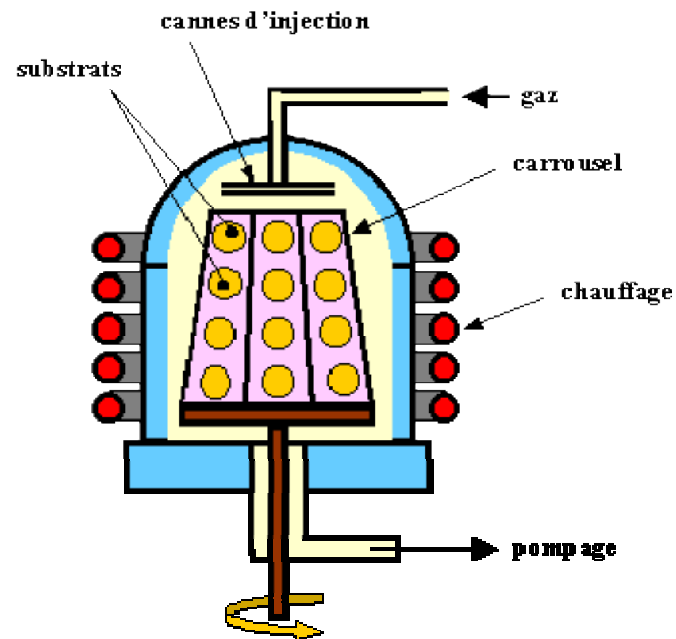


Cette technique consiste à faire croître le cristal par la mise en contact du substrat avec une source liquide.

C'est le même principe que le tirage d'un lingot par la méthode Czochralski. Il faut bien contrôler les échanges thermiques pour éviter de liquéfier le cristal existant.

Cette méthode présente l'avantage d'être très rapide, la vitesse de croissance peut être de l'ordre du micron par minute mais bien sûr n'a pas du tout la même précision que l'EJM.

# L'épithaxie en phase vapeur (VPE ou CVD)



Banc d'épitaxie en phase vapeur. Les gaz injectés contiennent en général du trichlorosilane, du HCl et de l'hydrogène

Cette opération consiste à faire croître le cristal à partir de sources de gaz contenant les éléments dopants.

Dans le réacteur, les gaz se dissocient pour fournir par exemple le silicium qui se dépose à la surface des plaquettes.

Pour assurer une bonne croissance ces dernières (plaquettes) sont chauffées.

Suivant la température de croissance, les réactions mises en jeu sont très différentes et peuvent même conduire à des effets négatifs.

Il faudra donc aussi contrôler les équilibres chimiques par injections de gaz résultant de la décomposition de la source.

# Procédés d'épithaxie en phase vapeur du silicium

Il existe différents types de procédés d'épitaxie du Silicium suivant la source de silicium qui peut être du SiCl<sub>4</sub>, SiHCl<sub>3</sub>, du SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> et du SiH<sub>4</sub>.

1) à partir du tétrachlorosilane,  $\text{SiCl}_4$ , la réaction est :



Elle s'effectue en général autour de  $1250^\circ\text{C}$ , ce qui entraîne durant l'épitaxie une redistribution importante des dopants.



2) à partir de trichlorosilane,  $\text{SiHCl}_3$ , la réaction est :



Elle s'effectue en général autour de  $1100^\circ\text{C}$  ; c'est la méthode industrielle la plus utilisée actuellement.

3) à partir de la pyrolyse du dichlorosilane,  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$ , la réaction est :



Cette réaction permet d'obtenir une bonne qualité du cristal avec une vitesse de dépôt relativement élevée.

## Remarque:

L'ensemble des trois méthodes précédentes présente l'inconvénient de produire de l'acide chlorhydrique qui peut attaquer le silicium en cours de croissance. Par contre, on peut jouer sur la pression partielle de ce composé pour contrôler la croissance.

4) à partir du silane, SiH<sub>4</sub> :

La réaction de pyrolyse du silane est une réaction irréversible :



Cette réaction s'effectue à 1000°C sans composés chlorés. Cette technique permet de réaliser des jonctions abruptes puisque la température n'est pas très élevée, mais le silane est un produit coûteux et dangereux (il s'enflamme instantanément à l'air libre) et la vitesse de dépôt est faible.

# LA DIFFUSION

## Phénomène de diffusion

Le phénomène de diffusion est un phénomène très général dans la nature, qui correspond à la tendance à l'étalement d'espèces, particules, atomes ou molécules grâce à une excitation énergétique apportée par la chaleur.

Suivant le milieu dans lequel se déplacent ces espèces, l'étalement sera plus ou moins grand.

A température ambiante le phénomène de diffusion sera très important dans un milieu gazeux, plus faible dans un milieu liquide et pratiquement nul dans un milieu solide.

Pour obtenir un phénomène de diffusion dans un solide ou un cristal, il faudra chauffer le matériau à des températures voisines de 1000°C.

### Remarque:

Dans la suite, nous nous intéresserons essentiellement aux mécanismes de diffusion dans le milieu solide, sachant qu'il est possible d'utiliser aussi des mécanismes en milieu gazeux voire liquide au niveau des mises en œuvre technologiques de procédés particuliers.

Pour mieux comprendre l'aspect macroscopique du phénomène de diffusion, il faut avoir une idée des phénomènes et mécanismes mis en jeu à l'échelle atomique.



## Mécanismes de diffusion à l'échelle atomique

Les mécanismes de diffusion mis en jeu dans un cristal vont dépendre de la nature du cristal et de la nature de l'espèce diffusante.

On peut noter que les atomes constituant le cristal peuvent eux-mêmes diffuser ; on parlera alors de mécanisme d'autodiffusion.

L'autodiffusion est importante puisqu'elle permet notamment de créer des lacunes dans le réseau cristallin.

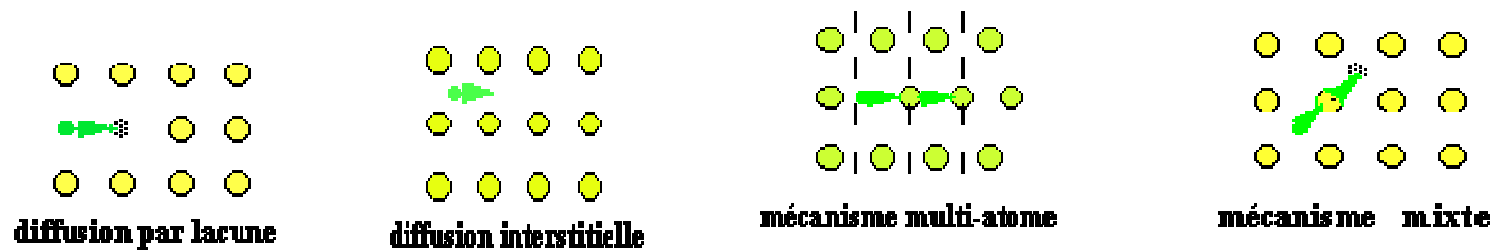


Figure 22 : Mécanismes de diffusion à l'échelle atomique. Ces mécanismes seront différents suivant la nature de l'espèce diffusante et du cristal.

Comme évoqué ci-dessus, les mécanismes ne seront possibles qu'à la condition que les espèces concernées soient suffisamment excitées (niveau d'énergie suffisant) pour statistiquement franchir les barrières d'énergie que constituent par exemple les barrières de potentiel atomique.

Ces barrières de potentiel vont dépendre des mécanismes mis en jeu. Par exemple un petit atome tel que le Bore pourra se "faufiler" entre les mailles du réseau cristallin et nécessitera donc une énergie plus faible pour se déplacer.

Les quatre principaux mécanismes recensés sont :

- mécanisme lacunaire, correspondant à l'occupation d'une lacune ou vacance laissée par un atome du réseau cristallin qui peut, lui aussi se mouvoir en laissant des lacunes,
- mécanisme interstitiel, correspondant au déplacement des atomes entre les sites cristallins. Ce mécanisme sera prépondérant pour les petits atomes,
- mécanisme interstitiel combiné au mécanisme lacunaire. Ce phénomène correspond à un placement en site substitutionnel d'un atome initialement positionné en site interstitiel tout en envoyant en site interstitiel l'atome en site cristallin d'origine. Ce phénomène correspond au "carreau sur place" du joueur de boules qui chasse la boule en lui prenant sa place,
- mécanisme de groupe mettant en jeu plusieurs atomes. Ce mécanisme de placement en force est plutôt typique des gros atomes.

# Equations de diffusion

La première loi de Fick traduit la tendance à l'étalement ;

le flux d'atomes est proportionnel au gradient de concentration de ces atomes et s'exprime par :

$$J = -D \frac{\partial C(x, t)}{\partial x}$$

équation dans laquelle  $D$  est le coefficient de diffusion.

$D$  dépend fortement de la température ; quasi-nul à la température ambiante, ce coefficient est de l'ordre de l'unité en micron carré par heure pour des températures de l'ordre de  $1100^{\circ}\text{C}$ .



La deuxième loi à prendre en compte est l'équation de continuité.

Dans un élément de volume donné, d'épaisseur  $dx$ , si le flux entrant est supérieur au flux sortant, la concentration de l'espèce considérée augmente.

Cette équation est aussi utilisée pour les porteurs électrons et trous dans un semi-conducteur mais dans le cas des atomes il n'y a ni génération, ni recombinaison.

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial J(x, t)}{\partial x}$$

La combinaison des deux équations précédentes permet d'aboutir à la deuxième loi de Fick suivante :

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \right) = D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2}$$

Pour intégrer cette équation différentielle qui comporte une dérivation par rapport au temps et une double dérivation par rapport à l'espace, il faut déterminer 3 conditions particulières (ou limites). Ces conditions vont dépendre du procédé technologique mis en œuvre.

# Procédés de diffusion

Les procédés de diffusion vont dépendre de la nature des sources de dopants.

Il existe trois grands types de sources qui permettent de fournir les éléments dopants que l'on doit faire pénétrer dans les substrats. Ces sources sont gazeuses, liquides ou solides.

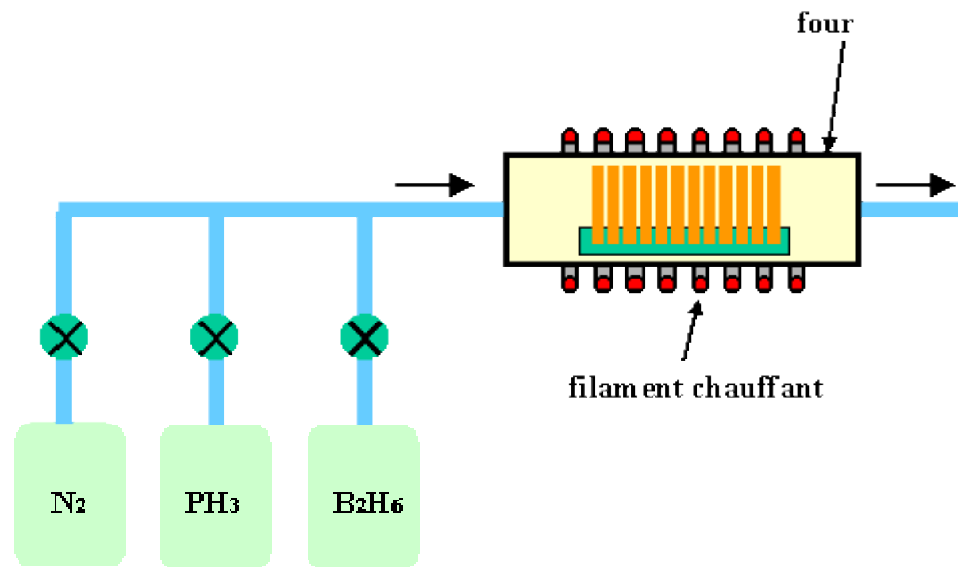


Figure 23 : Diffusion dans un four à partir de sources gazeuses. Les gaz dopants sont entraînés par un gaz porteur neutre, tel que l'azote.



Les sources gazeuses sont les gaz tels que l'Arsine,  $\text{AsH}_3$ , la phosphine,  $\text{PH}_3$  ou le diborane  $\text{B}_2\text{H}_6$  (figure 23).

Notons qu'il circule en permanence un gaz neutre (azote) afin d'éviter toute pollution par des éléments venant de l'atmosphère ambiante. Cet azote doit être très pur afin de ne pas polluer le four.

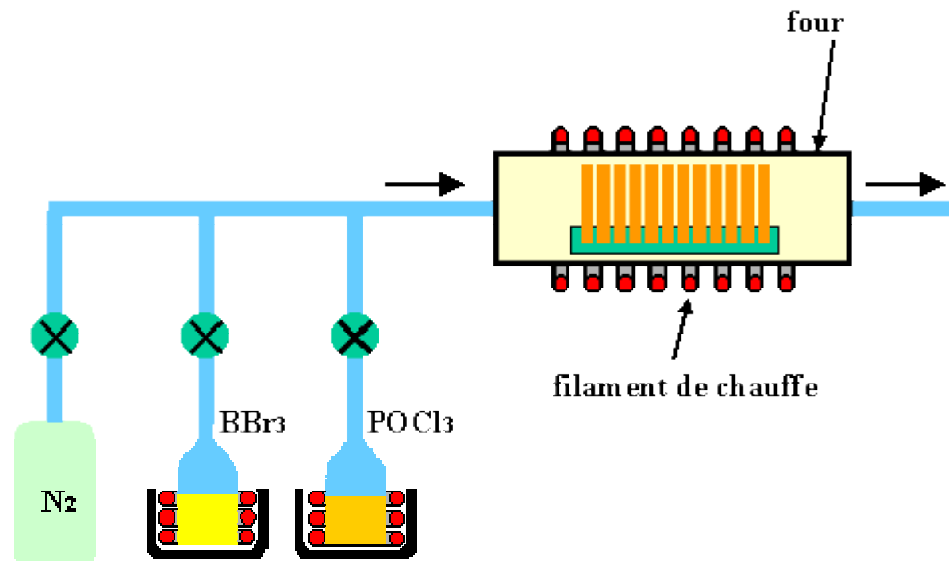


Figure 24 : Diffusion à partir de sources liquides. Les ballons contenant les liquides sont chauffés pour vaporiser le liquide afin de le faire pénétrer dans le four.

## Remarque:

Bien qu'*a priori* ces gaz soient simples à mettre en œuvre, ils sont par contre très dangereux puisque nocifs pour l'homme à quelques ppm de concentration. On leur préfère des sources liquides telles que  $\text{POCl}_3$  ou  $\text{BBr}_3$  qui sont liquides à température ambiante mais facilement vaporisées pour être introduites dans des fours de diffusion (figure 24).

On peut aussi utiliser des sources solides que sont les verres contenant les dopants tels que nitrure de bore ou verre dopé au phosphore. Ces sources se présentent sous forme de plaquettes et sont en général introduites dans le four en alternance avec les plaquettes à doper (figure 25).

Ces plaquettes sont activées par une oxydation qui permet de former un oxyde.

Dans le cas du Bore, du  $B_2O_5$  se forme. Ces oxydes ou verres s'évaporent et se déposent sur les plaquettes.

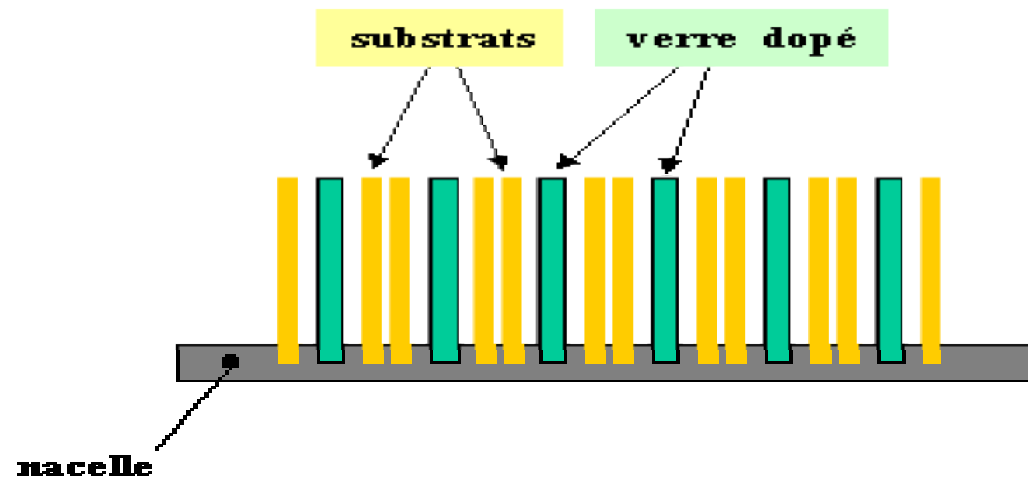


Figure 25 : Procédé de dopage à partir de sources solides. Les plaquettes de verre dopé permettent de réaliser un dépôt sur les substrats montés sur une nacelle (ou porte substrats).

Au cours de ce dépôt, une fraction pénètre depuis la surface dans le silicium. Après retrait des sources solides du four, les éléments dopants sont diffusés vers l'intérieur du substrat par une étape thermique à haute température.

En pratique, avant l'étape de diffusion, on élimine le verre déposé par gravure chimique, la quantité de dopant introduite dans le substrat en surface durant le dépôt étant suffisante.

### Diffusion à partir de sources gazeuses :

Dans le cas des sources gazeuses, la concentration en surface dans le milieu ambiant est constante ce qui signifie qu'en phase solide, en surface la concentration,  $C_s$ , est aussi constante. La condition limite s'écrit donc :

$$C(0, t) = C_s \text{ (quel que soit le temps en } x=0)$$

La deuxième condition est une condition initiale, qui suppose que la concentration de l'espèce à diffuser est initialement nulle (ou négligeable) dans le substrat. Cette condition s'écrit donc :

$$C(x, 0) = 0 \text{ (quel que soit } x \text{ à } t=0)$$

La dernière condition est plus intuitive. Elle postule qu'à une distance infinie, la concentration est nulle quel que soit le temps. Cela se conçoit bien si l'on se rappelle que pour que la diffusion se produise, il faut un gradient non nul de concentration.

$$C(\infty, t) = 0 \text{ (quel que soit le temps)}$$



# IMPLANTATION IONIQUE

## Introduction :

Cette opération consiste à introduire des atomes ionisés projectiles avec suffisamment d'énergie pour pénétrer dans l'échantillon cible (en général une plaquette).

Cette pénétration ne s'effectue que dans des régions de surface.

Cette opération est essentiellement utilisée pour doper le semiconducteur durant la fabrication des dispositifs (pour la création de zones de source ou de drain d'un transistor MOS, d'une base et d'un émetteur dans un transistor bipolaire, etc...).

Les atomes dopants sont en général : B, P, As, In, etc...

Les énergies des atomes ionisés peuvent être dans la gamme 3 keV à 500 keV.

En fonction de la nature du matériau implanté, de la nature de l'ion accéléré et de l'énergie d'accélération, la profondeur moyenne de pénétration peut aller de 100 Å à 1 mm. En effet, un calcul approximatif montre qu'une centaine d'électron-volts est perdue par couche atomique (environ 2,5 Å).

## Intérêt de cette technique :

Elle permet un contrôle précis de la quantité totale d'atomes implantés (dose d'implantation) et du profil de concentration du dopant.

Cette précision permet en particulier l'ajustement de la valeur du gain en courant d'un transistor bipolaire ou l'ajustement de la tension de seuil d'un transistor MOS (choix de la nature d'un transistor - à enrichissement ou à appauvrissement).

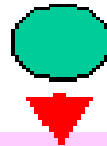
Notons que ce procédé s'effectue sous vide et donc en atmosphère sèche.

## Inconvénients :

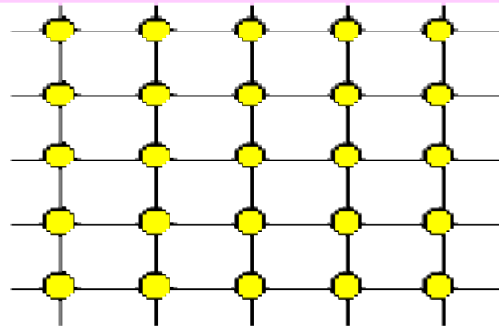
Le bombardement d'un monocristal par des atomes crée des dommages dans la structure cristalline implantée. Il y a donc nécessité de restituer la cristallinité du matériau ; ceci est réalisé par un recuit thermique.

Ce recuit thermique permet aussi une redistribution des atomes dopants et donc une modification du profil de dopage par phénomène de diffusion.

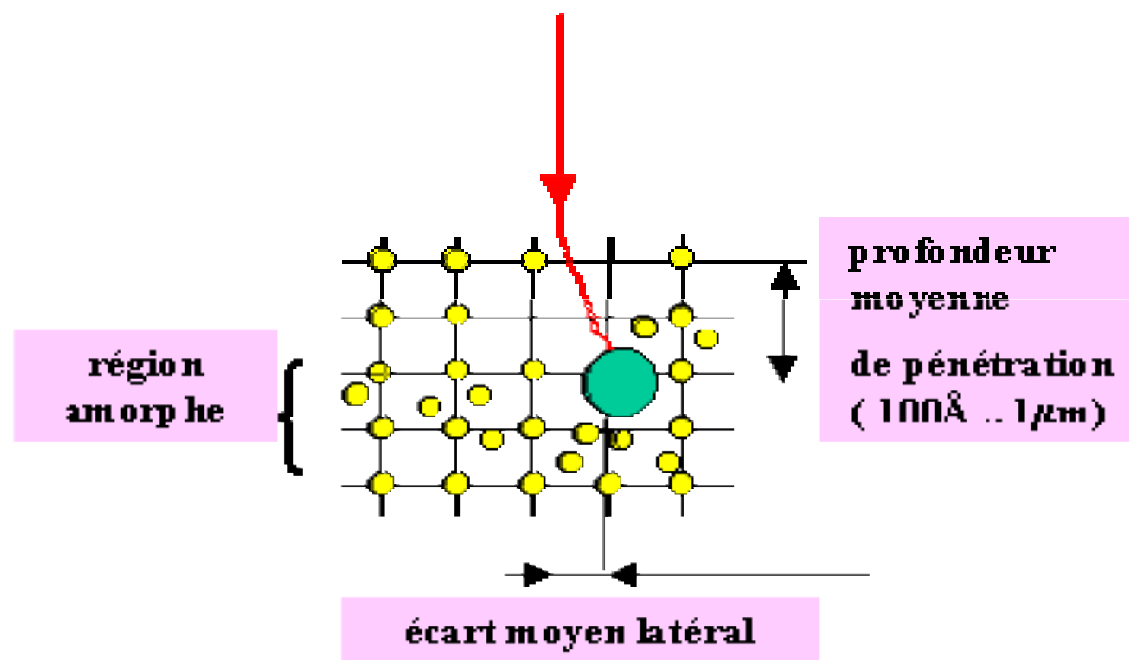
Notons que ce recuit peut aussi permettre l'activation du dopant implanté (passage en site substitutionnel).



**ion accéléré  
(énergie : 3 .. 500 keV)**



Cristal avant implantation



Cristal après implantation



## L'implanteur :

L'implanteur est en pratique un accélérateur d'ions. Il est composé des parties suivantes visibles sur la figure 31 :

- génération des ions à partir d'une source solide, liquide ou gazeuse dans un plasma excité à 25kV,
- sélection des ions par champ magnétique effectuant le tri par le rapport masse sur charge,
- accélération des ions à l'énergie d'implantation souhaitée,
- mise en forme du faisceau d'ions par des lentilles électrostatiques,
- dispositif de balayage en x et y afin d'implanter de façon uniforme les plaquettes. Les fréquences de balayage sont telles qu'il y ait en permanence glissement de la courbe de Lissajou associée.

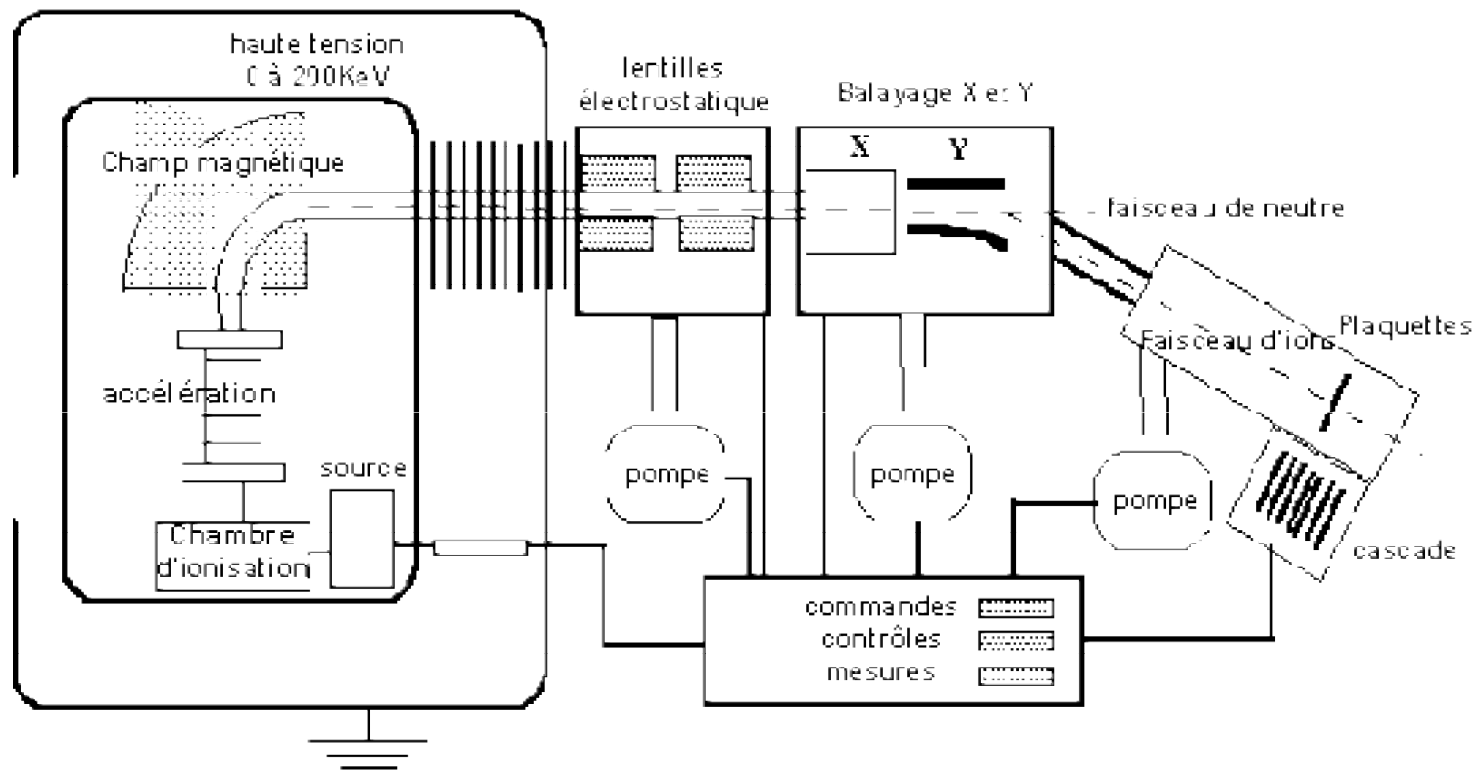
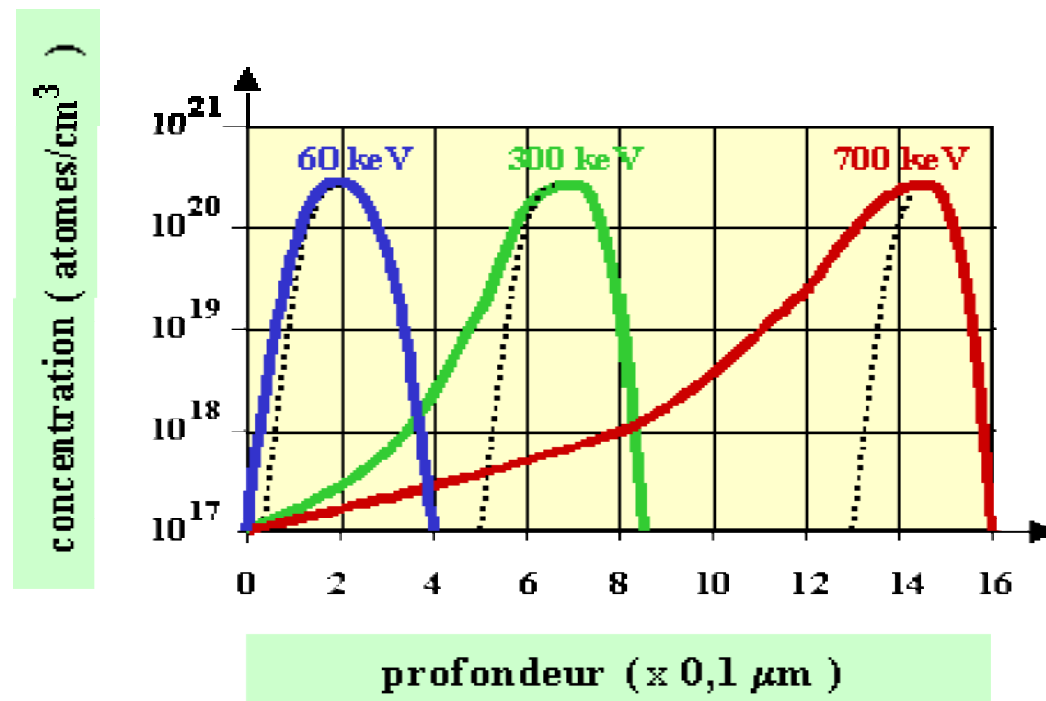


Figure 31 : Schéma simplifié d'un implanteur ionique d'énergie d'accélération maximale de 200keV.

La figure 36 montre les profils obtenus suite à une implantation de bore à différentes énergies.



# L' OXYDATION

## Importance de l'oxydation du Silicium

L'oxydation est une étape très importante dans la réalisation des circuits intégrés au silicium, puisque c'est grâce à cette propriété spécifique que le silicium, qui n'est pas *a priori* un très bon semi-conducteur, est devenu le matériau le plus utilisé en microélectronique.

Cette opération est nécessaire tout au long des procédés modernes de fabrication des circuits intégrés. Il est donc primordial de savoir réaliser un oxyde de bonne qualité.

L'oxyde peut servir :

- de masque d'implantation ou de diffusion de dopants,
- de couche passivante à la surface du silicium,
- de zones d'isolation entre différents composants d'une structure intégrée,
- de couche active dans les transistors MOS (oxyde de grille),

- d'isolation électrique entre des couches adjacentes pour améliorer l'intégration et la diminution des dimensions ("espaceur" par exemple, cf. plus loin),
- d'isolation électrique entre les différents niveaux de métallisation ou de couches conductrices en silicium polycristallin fortement dopé,

- de couches sacrificielles permettant d'améliorer les performances et l'intégration des circuits.

Ces couches sacrificielles peuvent aussi être utilisées pour fabriquer des microstructures à base de silicium polycristallin et intervenir dans des microsystemes intégrés (MEMS : micro-electro-mechanical systems).



## Principe de l'oxydation

Il existe plusieurs techniques pour obtenir un oxyde :

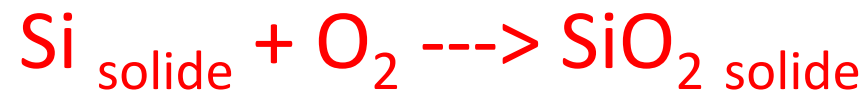
- l'oxydation thermique en présence d'oxygène, dite oxydation sèche,
- l'oxydation thermique par voie humide en présence d'oxygène et de vapeur d'eau,
- l'oxydation thermique vapeur en présence de vapeur d'eau uniquement,
- l'oxydation anodique, obtenue par voie électrochimique,
- l'oxydation plasma, réalisée à l'aide d'un plasma d'oxygène.

## Remarque:

Notons que nous différentierons dans la suite, l'opération technologique d'oxydation de celle du dépôt d'oxyde qui n'entraîne pas les mêmes contraintes, thermiques notamment.

L'opération d'oxydation consiste donc à oxyder le Silicium depuis la surface du substrat.

Les réactions principales sont les suivantes :



Pour obtenir un oxyde de qualité électronique satisfaisante, on préfère l'oxydation thermique soit avec de l'oxygène, soit en présence de vapeur d'eau.

En général, la croissance de l'oxyde avec de l'oxygène pur donne une croissance plus lente de l'oxyde et lui confère de bonnes propriétés électroniques (peu de défauts électriquement actifs).

La croissance avec de l'eau donne une croissance plus rapide mais plus de défauts électriques.

Cette méthode sera donc préférée pour réaliser des oxydes épais (quelques milliers d'Angström) de masquage ou d'isolation.

## Remarque:

Le Silicium s'oxyde à température ambiante en présence de l'atmosphère (qui contient de l'oxygène) ; mais dès que la couche d'oxyde atteint 2 ou 3 couches atomiques, le phénomène d'oxydation se bloque. On dit que la couche est passivante. Pour obtenir une oxydation sur une "grande épaisseur", il faudra activer le phénomène par une élévation de température.

La couche de Silicium initiale réagit avec l'élément oxydant pour former le  $\text{SiO}_2$  ; on va ainsi consommer du Silicium.

L'interface  $\text{Si/SiO}_2$  va donc se retrouver "au-dessous" de la surface initiale. Un calcul simple montre que la fraction d'épaisseur située "au-dessous" de la surface initiale représente 46% de l'épaisseur totale de l'oxyde ; la fraction "au-dessus" représente donc 54% (figure 37).

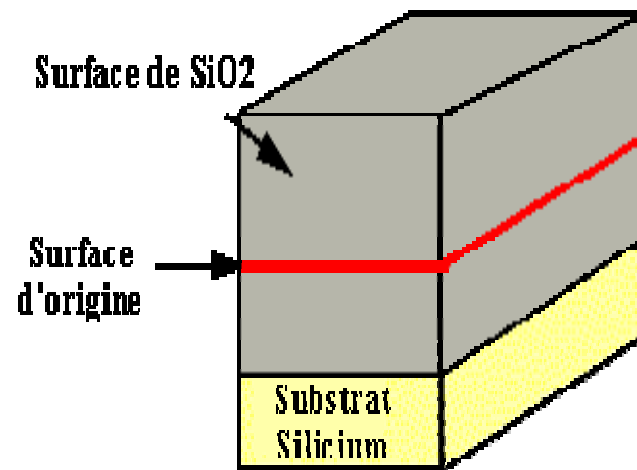


Figure 37 : Oxydation du Silicium. Une partie du substrat a été consommée lors de l'oxydation (d'après S.M. Sze [2]).



L'augmentation de volume qui en découle aura des conséquences importantes sur la planéité de la surface de la plaquette lorsque l'on réalisera des oxydations localisées.

En effet, l'augmentation de volume sera locale et créera donc un relief comme représenté figure 38.

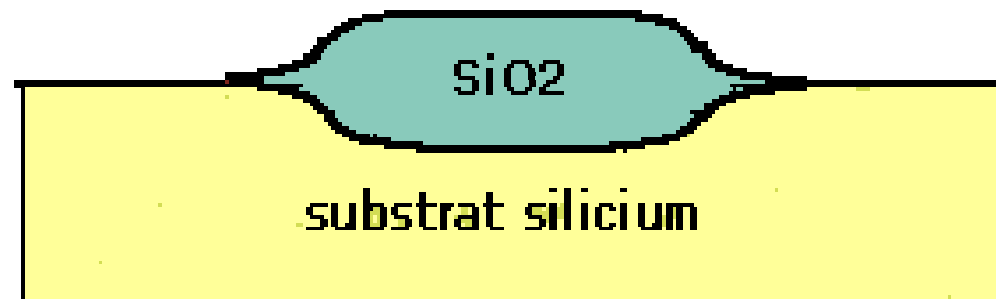


Figure 38 : Effet d'une oxydation localisée du Silicium. L'augmentation de volume crée un relief à la surface de la plaquette.

Les opérations d'oxydations s'effectuent en général dans des fours similaires à ceux de diffusion dans lesquels on fait circuler de l'oxygène, sec ou humide, ou de la vapeur d'eau (figure 39).

Toutefois, dans les technologies submicroniques, les plaquettes peuvent être traitées dans des réacteurs à chauffage très rapide à lampes (type halogène) en présence d'un élément oxydant. Cette technique s'appelle oxydation thermique rapide (RTO) et sera revue plus loin.

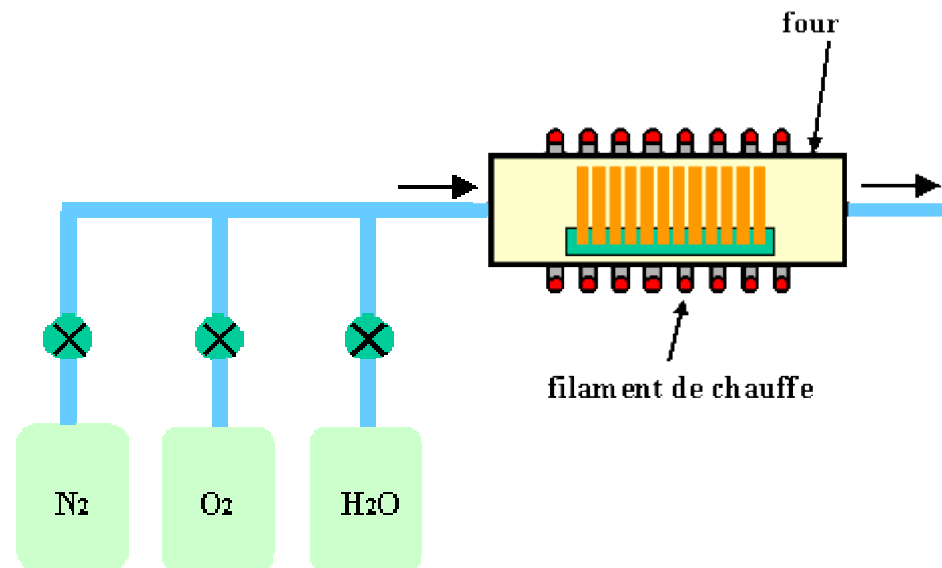


Figure 39 : Oxydation thermique avec de l'oxygène ou de la vapeur d'eau. On peut aussi fabriquer la vapeur d'eau à partir d'une torche à hydrogène brûlant en présence d'oxygène (oxydation vapeur ;  $O_2 + 2 H_2 \rightarrow 2 H_2O$ )

## Modélisation de l'oxydation:

Le modèle de base de l'oxydation est représenté sur la figure 40 qui distingue les 3 domaines dans lesquels il faut considérer des mécanismes différents :

- l'atmosphère ambiante contenant l'élément oxydant (soit de l'oxygène soit de la vapeur d'eau soit une combinaison de ces deux éléments,
- l'oxyde qui est traversé par l'élément oxydant par phénomène de diffusion. Notons que cette diffusion est négligeable à température ambiante mais fortement activée thermiquement,
- le Silicium, à la surface duquel se produit la réaction chimique d'oxydation.

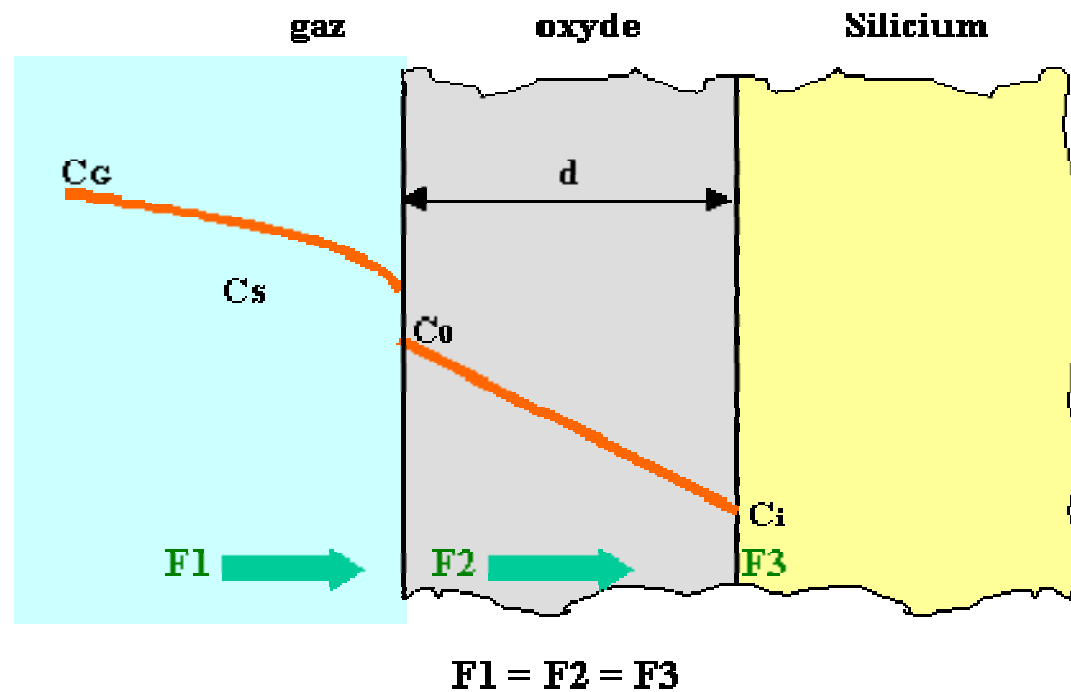


Figure 40 : Modèle de base pour l'oxydation thermique. On met en oeuvre les 3 flux de l'espèce oxydante en phase gazeuse, dans l'oxyde et à l'interface Si/SiO<sub>2</sub> (d'après B.E. Deal and A.S. Grove [9]).

Le calcul est basé sur l'analyse des flux de l'espèce oxydante dans les différentes zones.

Si on raisonne en régime stationnaire, les trois flux sont égaux :

$$F1 = F2 = F3$$

F1 est le flux de l'élément oxydant en phase gazeuse. On a donc une équation de diffusion type 1ère loi de Fick. En appelant CG la concentration dans l'atmosphère, loin de la surface, et CS, la concentration en surface

$$F1 = hG (CG - CS)$$

hG est le coefficient de transfert de masse en phase gazeuse.



On peut relier les concentrations  $C_G$  et  $C_S$  en fonction des pressions partielles en utilisant la loi des gaz parfaits :

$$C_G = P_G/kT \quad \text{et} \quad C_S = P_S/kT$$

En utilisant la loi de Henry, on peut convertir la pression partielle en surface du cristal en une concentration équivalente à la surface mais du côté matériau solide.

$$C_O = H.p_S \quad \text{et} \quad C^* = H.p_G$$

H est la constante de Henry et  $C^*$  est la concentration équivalente que l'on aurait dans le cristal pour une pression partielle dans le gaz.

On peut ainsi écrire le flux  $F_1$  :

$$F_1 = h (C^* - C_o)$$

$h$  est le coefficient de transfert massique, avec

$$h = h_G / H k T$$

F2 est le flux de l'élément oxydant dans l'oxyde,  
qui obéit à la loi de Fick :

$F_2 = -D \frac{\partial C}{\partial d}$       soit encore

$$F_2 = D(C_0 - C_i) / d_0$$

F3 est le flux de réaction chimique à l'interface Si/SiO<sub>2</sub>. ce flux est proportionnel à la concentration de l'espèce oxydante au niveau de l'interface.

$$F_3 = k_s.C_i$$

A partir de la relation  $F_1 = F_2 = F_3$ , on en déduit les coefficients  $C_i$  et  $C_o$  :

$$C_1 = \frac{C^*}{1 + \frac{k_s}{h} + \frac{k_s d_0}{D}}$$

$$C_o = \frac{\left(1 - \frac{k_s d_o}{D}\right) \cdot C^*}{1 + \frac{k_s}{h} + \frac{k_s d_o}{D}}$$



En supposant qu'au temps  $t = 0$ , l'épaisseur (initiale) de l'oxyde est  $d_i$ , la résolution de l'équation différentielle du premier ordre conduit à la solution :

$$d_o^2 + A.d_o = B (t + \tau)$$

On peut alors exprimer l'épaisseur de l'oxyde,  $d_o$ , en fonction de  $A$ ,  $B$  et  $t$ .

$$\frac{d_0}{A/2} = \sqrt{1 + \frac{t+t}{A^2/4B}} - 1$$

On peut simplifier l'expression de  $d_o$  en regardant des situations limites :

pour des temps importants, l'épaisseur varie en racine du temps, c'est-à-dire que la croissance sera de plus en plus lente. Il faudra donc jouer sur la valeur de B en fonction de la température pour avoir des temps raisonnables d'oxydation (de quelques dizaines de minutes à quelques heures maximum).

$$t \gg \tau$$

$$d_o^2 = B.t$$

pour des temps faibles, l'épaisseur est proportionnelle au temps. La condition est la suivante :

$$(t + \tau) \ll A^2/4B \quad d_o = (B/A).(t + \tau)$$

Les coefficients, A, B et t sont donnés dans les tableaux qui suivent (d'après B.E. Deal and A.S. Grove [9]).

Ils dépendent du type de l'oxydation, sèche ou humide, et fortement de la température.

# LES DEPÔTS

## Introduction :

Cette opération est nécessaire lorsqu'il faut réaliser une couche conductrice, isolante ou de masquage dans un procédé qui n'utilise pas directement le matériau du substrat.

Par exemple, dans le cas où l'on souhaite obtenir un oxyde de silicium lorsque le substrat et/ou la couche sous-jacente ne sont pas constitués de Silicium (celle-ci peut être par exemple une couche métallique ou une couche de nitrure de Silicium), la seule solution consiste à déposer de l'oxyde (ou un autre type d'isolant).

En effet, l'oxydation thermique n'est plus possible et il faut effectuer un dépôt. Celui-ci s'effectue dans un four ou un bâti qui comprend tous les constituants de la couche à réaliser.



## Remarque:

Les techniques de dépôt qui seront utilisées pour déposer une couche d'isolant ou d'oxyde seront le plus souvent très générales en permettant la réalisation de couches d'autres matériaux tels que des métaux voire des semi-conducteurs.

Plusieurs techniques de dépôt sont possibles industriellement :

- évaporation thermique.
- pulvérisation cathodique,
- canon à électrons,
- dépôt chimique en phase vapeur ou C.V.D pour Chemical Vapor Deposition,
- dépôt à basse pression, L.P.C.V.D. pour Low Pressure Chemical Vapor Deposition,
- dépôt assisté plasma, P.E.C.V.D. pour Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition,

## Evaporation thermique :

La technique d'évaporation thermique est très simple et consiste simplement à chauffer par effet Joule un matériau qui, vaporisé, va se déposer sur les substrats.

La charge du matériau à déposer est placée dans un creuset (en tungstène).

Cette technique est applicable notamment pour le dépôt d'aluminium, la température d'évaporation de ce métal étant inférieure à la température de fusion du creuset (en tungstène).

La figure 46 montre le principe de cette technique ; le bâti est similaire à celui de la technique de dépôt par canon à électrons. Afin d'améliorer l'homogénéité des couches déposées (très faible variations d'épaisseur), on déplace en permanence les substrats. Dans la cas du bâti ci-dessous, le porte substrat est tournant.

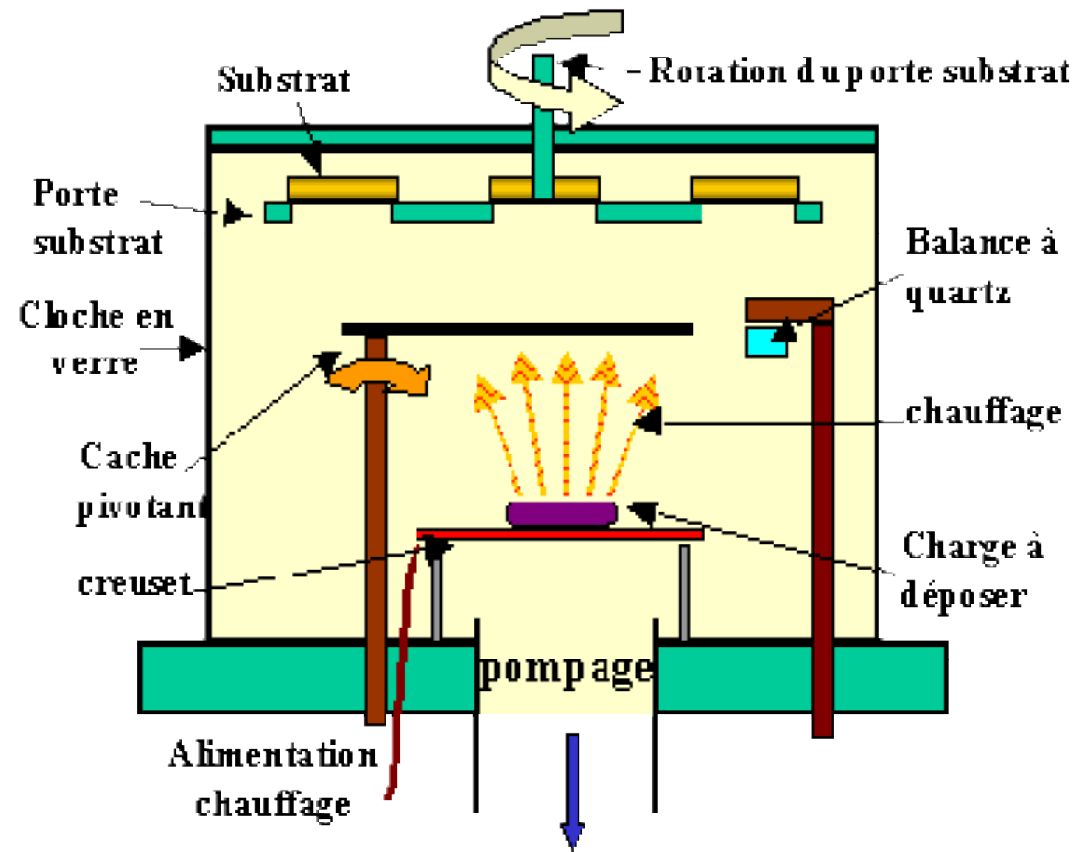


Figure 46 : Bâti de dépôt par évaporation thermique. Le creuset contenant la charge du matériau à déposer est chauffé par effet Joule.

### Remarque:

Afin de contrôler l'épaisseur des couches déposées, on utilise une balance à quartz. Le principe de celle-ci consiste à détecter la dérive de la fréquence d'oscillation du quartz par la modification de sa masse lors de la croissance de la couche déposée (le dépôt s'effectue aussi sur la quartz). C'est donc une mesure électrique qu'il faut bien évidemment étalonner.

A chaque début d'expérience, la fréquence de référence est redéfinie. En mesurant le décalage de fréquence en fonction du temps, on peut aussi déterminer la vitesse de croissance des couches déposées.

## Dépôts par pulvérisation cathodique ou canon à électrons :

La pulvérisation cathodique consiste à bombarder une cible par des ions, à arracher les ions de la cible et à les envoyer se déposer sur le substrat. Dans le cas de la figure 47, montrant de façon simplifiée le principe de cette technique, les ions argon, créés par l'excitation haute tension, arrachent de la cible les composés à déposer sur la surface des substrats.



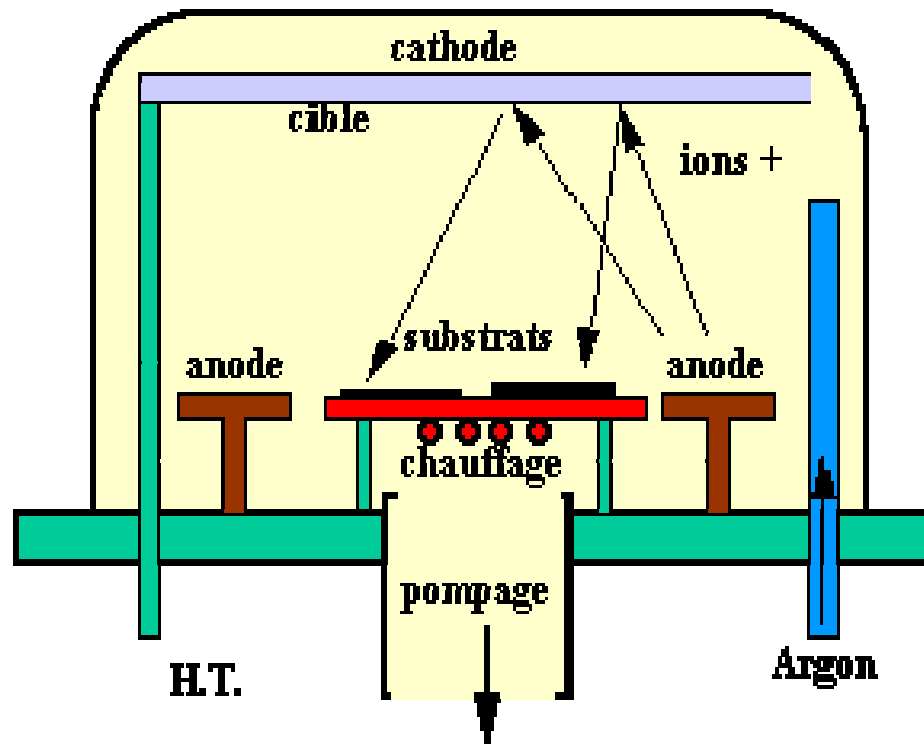


Figure 47 : Bâti de dépôt par pulvérisation cathodique. Les ions Argon, créés par l'excitation haute tension, arrachent de la cible les composés à déposer sur la surface des substrats.

La technique du canon à électron consiste à apporter suffisamment d'énergie (très concentrée) sur un matériau souvent réfractaire à l'aide d'un faisceau d'électrons focalisé.

Les électrons sont créés par effet thermoélectrique (chauffage d'un filament) et leur trajectoire est focalisée grâce à l'action conjuguée d'une différence de potentiel électrique et d'un champ magnétique. Ce dernier incurve la trajectoire du faisceau pour focaliser celui-ci sur la cible. La figure suivante montre de façon simplifiée le principe de cette technique.

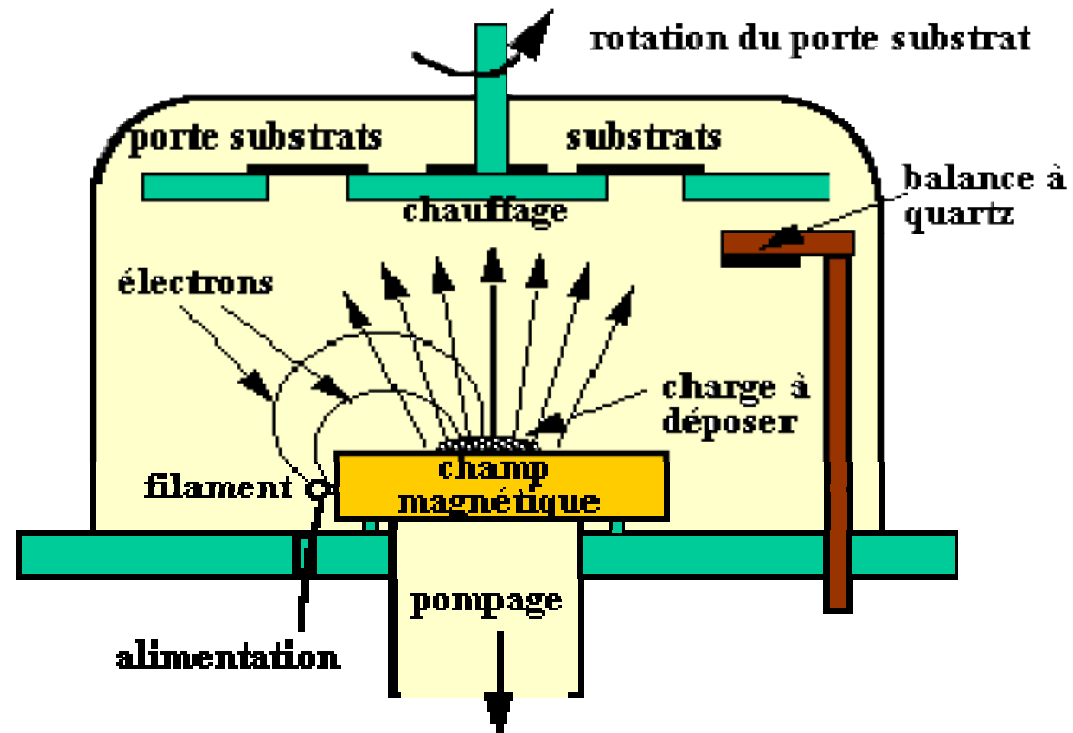


Figure 48 : Bâti de dépôt par canon à électrons. Le filament chauffé sert de source d'électrons. Les électrons sont déviés par le champ magnétique et envoyés sur la charge à vaporiser.

## Dépôts chimiques en phase vapeur (CVD) :

Les techniques C.V.D. permettent quant à elles de faire croître des couches d'isolants ou de Silicium polycristallin.

Elles s'effectuent en général dans un four dans lequel on introduit les espèces réactantes.

Suivant les valeurs de la pression de dépôt, on modifie la qualité des couches (propriétés structurales et électriques).

Les techniques à basse pression (L.P.C.V.D.) permettent de déposer du silicium polycristallin, dont l'utilisation dans les procédés technologiques a permis une nette amélioration de l'intégration (autoalignement des grilles de transistor MOS ou des émetteurs des transistors bipolaires, interconnexions, sources de dopant, etc..).

Dans le cas de couches isolantes, pour améliorer l'efficacité de la réaction chimique dans le four, on peut activer les molécules mises en jeu par une source radiofréquence dont la fréquence est industriellement fixée à 13,56 MHz, valeur autorisée par l'Administration des Télécommunications. On intitule cette technique P.E.C.V.D.

## Dépôts chimiques en phase vapeur à basse pression (LPCVD) :

Une autre technique de dépôt comme évoquée ci-dessus est la technique LPCVD. Cette technique consiste à réaliser un dépôt chimique en phase vapeur à basse pression.

Ce dépôt s'effectue normalement dans un four à mur chaud à des températures de l'ordre de 500 à 600°C.

On injecte les gaz qui réagissent et qui synthétisent le matériau à déposer.

Dans l'exemple de la figure suivante, le dépôt réalisé est du silicium polycristallin (ou polysilicium) dopé au phosphore. Lorsque le matériau est dopé au cours de son élaboration, on dit qu'il est dopé *in-situ*.



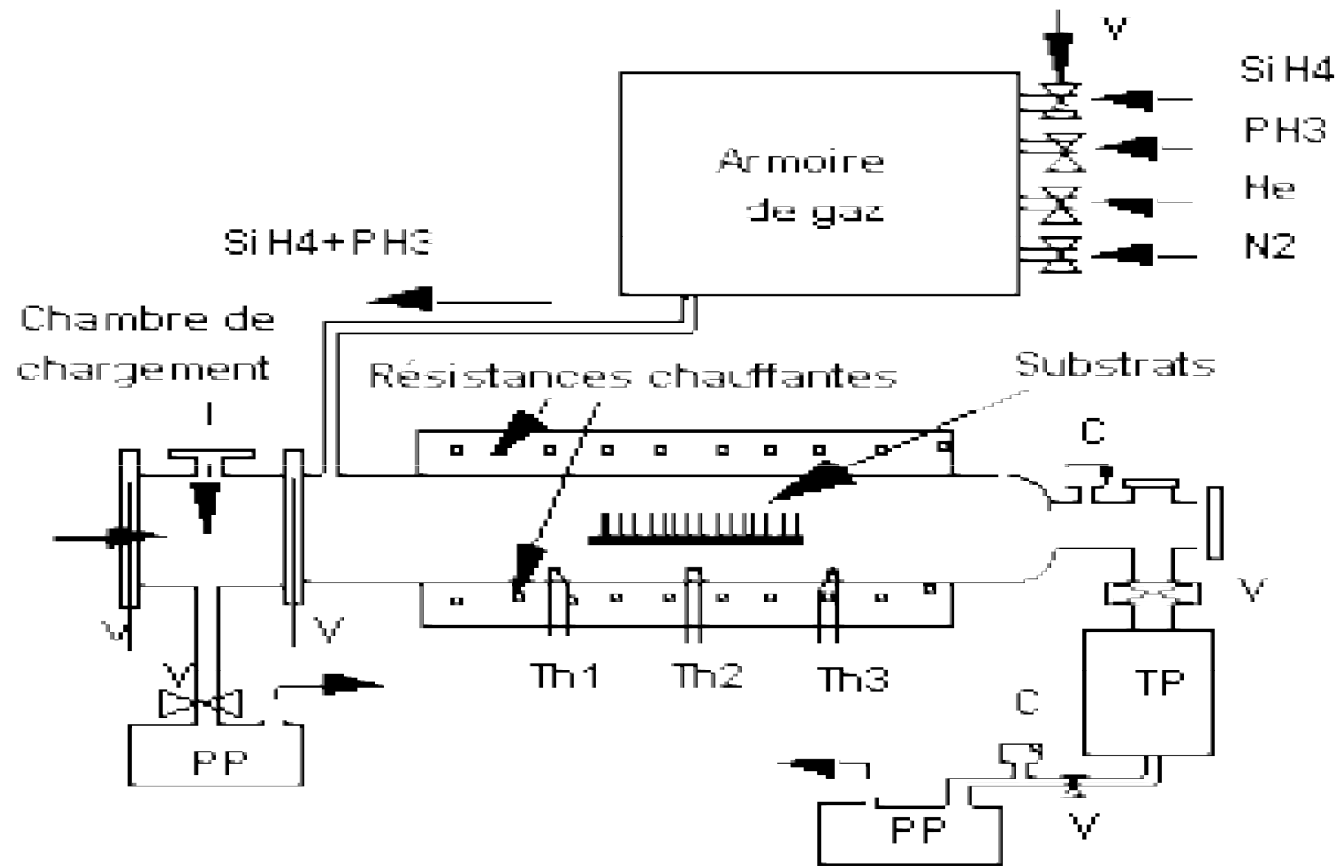


Figure 52 : Réacteur LPCVD pour déposer du polysilicium dopé au phosphore *in-situ*. (d'après A. Liba [14] et O. Bonnaud [15])

Pour ce type de dépôts les paramètres les plus importants sont la pression, la température et le type de gaz dopant utilisé.

De ces paramètres, dépendent la morphologie du matériau qui conditionne aussi les propriétés électriques.

Les résultats récents sur ces techniques ont montré qu'il était préférable de déposer le matériau silicium sous forme amorphe (température de dépôt autour de 550°C) et de cristalliser ensuite la couche ainsi formée par un recuit thermique, soit conventionnel, soit rapide, notamment à l'aide d'un laser.

# LA GRAVURE

## Présentation :

Deux techniques sont couramment utilisées :

- la gravure dite par voie humide,
- la gravure sèche.

Ces deux types de gravure interviennent de nombreuses fois au cours des procédés modernes.

Elles permettent de graver de façon sélective, des couches ou des films afin de créer des motifs (zone actives de dispositifs, grille de transistors, pistes d'interconnexion, etc...).

Nous verrons dans les opérations de photolithogravure qu'en utilisant une résine photosensible on peut protéger des zones.

La gravure ne doit donc dans ce cas concerner que les zones non protégées.

## La gravure humide :

La gravure par voie humide se fait par attaque chimique en solution aqueuse (bain contenant de l'eau).

Par exemple, l'oxyde de silicium est gravé par une solution partiellement diluée d'acide fluorhydrique (HF) tamponnée par du fluorure d'ammonium ( $\text{NH}_4\text{F}$ ).

Suivant les concentrations de l'espèce réactante, on étalonne les vitesses de gravure pour un type de couche.

En général, par voie humide, la couche est attaquée de façon équivalente suivant toutes les directions de l'espace. On dit que la gravure est **isotropique**.

Dans de très nombreuses filières technologiques, la gravure humide est utilisée majoritairement car elle est relativement simple à mettre en oeuvre et que dans des grands bacs, un lot complet pouvant contenir jusqu'à 200 plaquettes peut être traité en une seule opération.



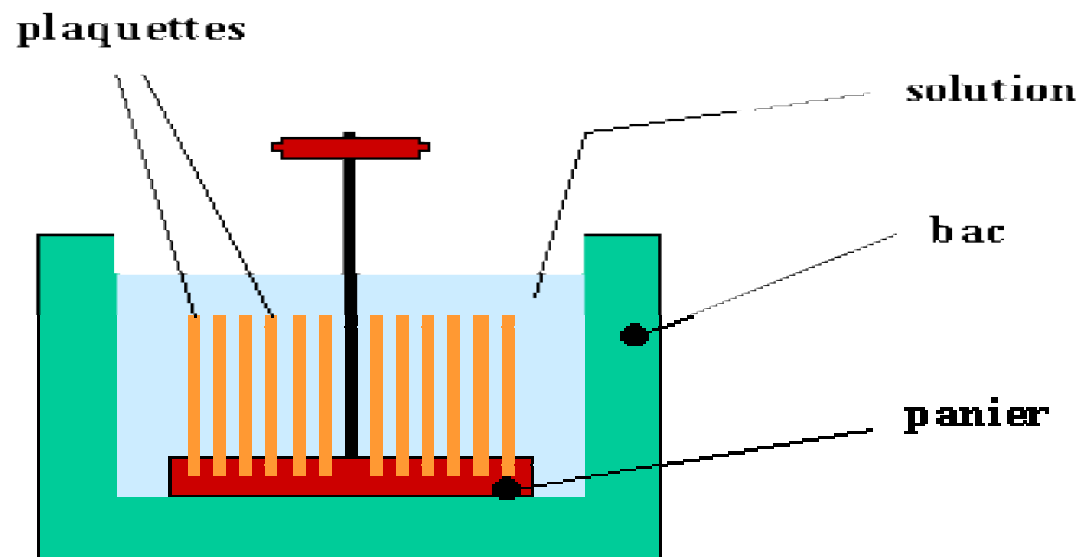


Figure 53 : Gravure d'un panier de plaquette par voie humide.

Cela constitue un gain de temps considérable. Par contre, il faut après traitement chimique rincer abondamment et sécher les plaquettes. Le rinçage se fait aussi dans des bacs. Durant le rinçage à l'eau désionisée, la résistivité de l'eau est contrôlée afin de déterminer la quantité d'ions contaminants encore désorbés par les plaquettes. Lorsque la résistivité devient supérieure à 16 MW.cm, on s'approche de la résistivité de l'eau ultra pure (18 MW.cm) et on peut arrêter le rinçage.

Le séchage s'effectue dans de très grandes centrifugeuses ou par soufflette d'azote ou d'air sec.

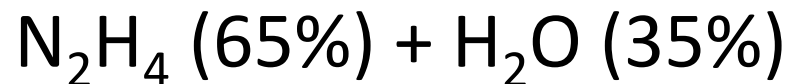
La gravure humide présente aussi des inconvénients, à savoir :

- la gravure est **isotropique** (toutes les directions de l'espace) ce qui crée des **attaques latérales** notamment dans les zones protégées par la résine,
- la vitesse de gravure dépend de la concentration et du type d'impureté que contient le film à graver. Cette vitesse de gravure dépend de la quantité des substrats traités. L'efficacité d'attaque diminue après plusieurs lots,
- le point de fin de gravure est difficilement contrôlé. Cela peut entraîner une surgravure latérale ou verticale dans le cas d'une faible sélectivité.

Les solutions les plus couramment utilisées en fonction de la nature des couches à graver sont les suivantes :

- silicium polycristallin:  $\text{HNO}_3 + \text{HF}$

- silicium monocristallin Hydrazine:



- dioxyde de silicium:  $\text{HF} + \text{NH}_4\text{F} + \text{H}_2\text{O}$

- nitrure de silicium:  $\text{H}_3\text{PO}_4$

- aluminium:



En fonction des concentrations relatives des différents éléments, les solutions auront une vitesse d'attaque plus ou moins importante.

Dans le cas de la gravure d'un oxyde recouvrant du silicium monocristallin, la fin de gravure est détectée grâce au phénomène d'hydrophobie ; le liquide a tendance à quitter la surface de la plaquette alors qu'en présence d'oxyde toute la surface est mouillée. Ce critère permet aussi de vérifier l'homogénéité d'épaisseur des couches et/ou d'attaque.

## La gravure sèche :

La gravure sèche 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. On la dénomme R.I.E. (Reactive Ion Etching en anglais).

Le réacteur ressemble au réacteur de dépôt à platine porte-substrats horizontale, mais les gaz injectés sont, dans ce cas, destinés à graver la couche de surface (voir figure).

De la même façon, on utilise un générateur radiofréquence qui va permettre de générer dans le réacteur les espèces réactives.

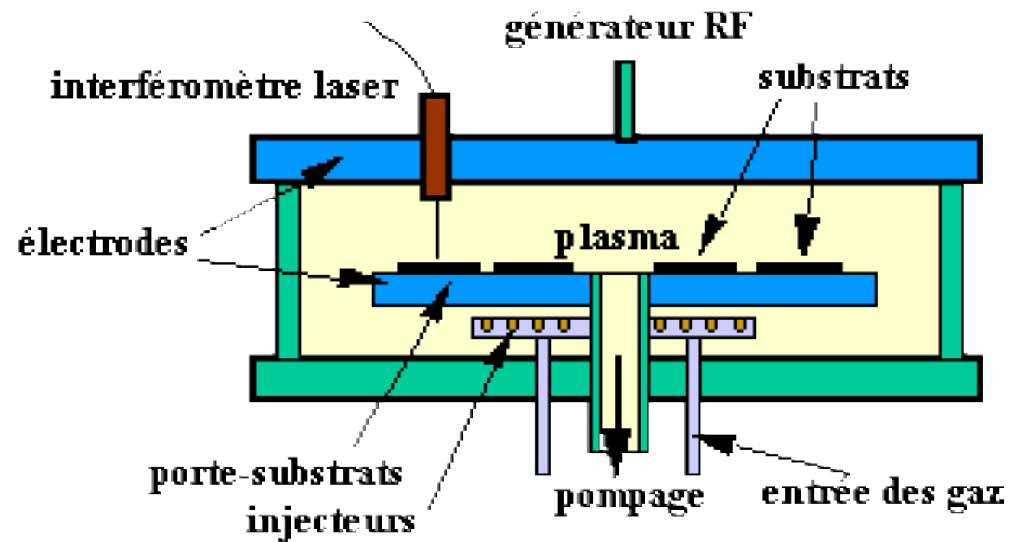


Figure 54 : Réacteur de gravure plasma à platine porte-substrats horizontale. Ce réacteur est de conception très similaire à celui de dépôt plasma de la figure 48 (d'après S.M. Sze [5]).



Le principe du procédé, représenté figure 55, est résumé comme suit :

- 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 le matériau de surface. Le matériau produit par la réaction doit être volatil pour pouvoir quitter la surface,
- désorption du produit de réaction,
- diffusion dans l'environnement gazeux.

## Remarque:

Si toutes ces conditions sont remplies, on peut alors espérer avoir un bonne gravure plasma.

Notons que pour la mise au point de cette étape technologique, la difficulté est de générer des espèces volatiles après réaction en surface.

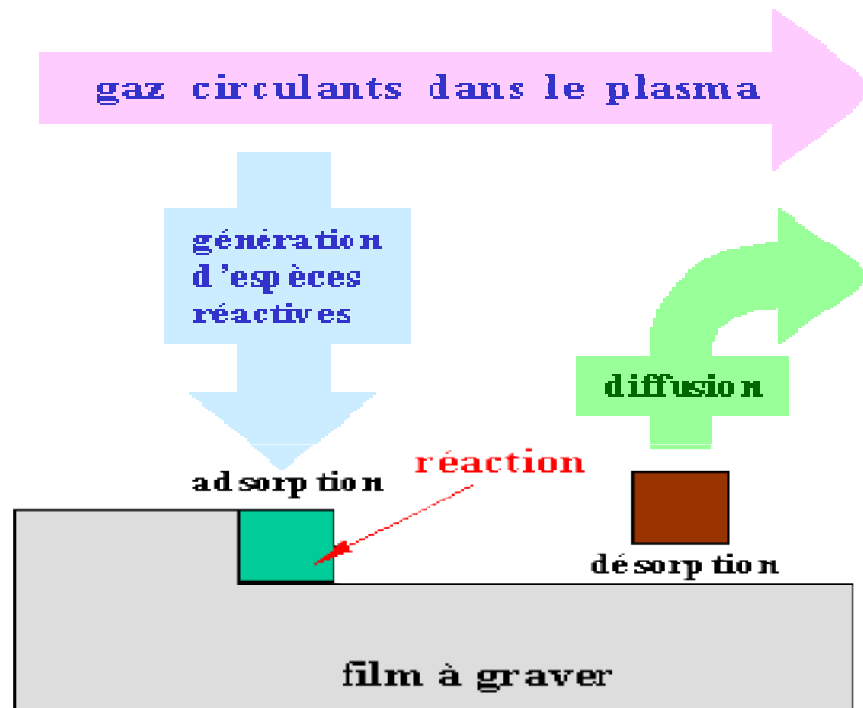


Figure 55 : Schéma de principe de la réaction de gravure plasma. Pour que la gravure soit efficace, il faut éliminer les produits de réaction.

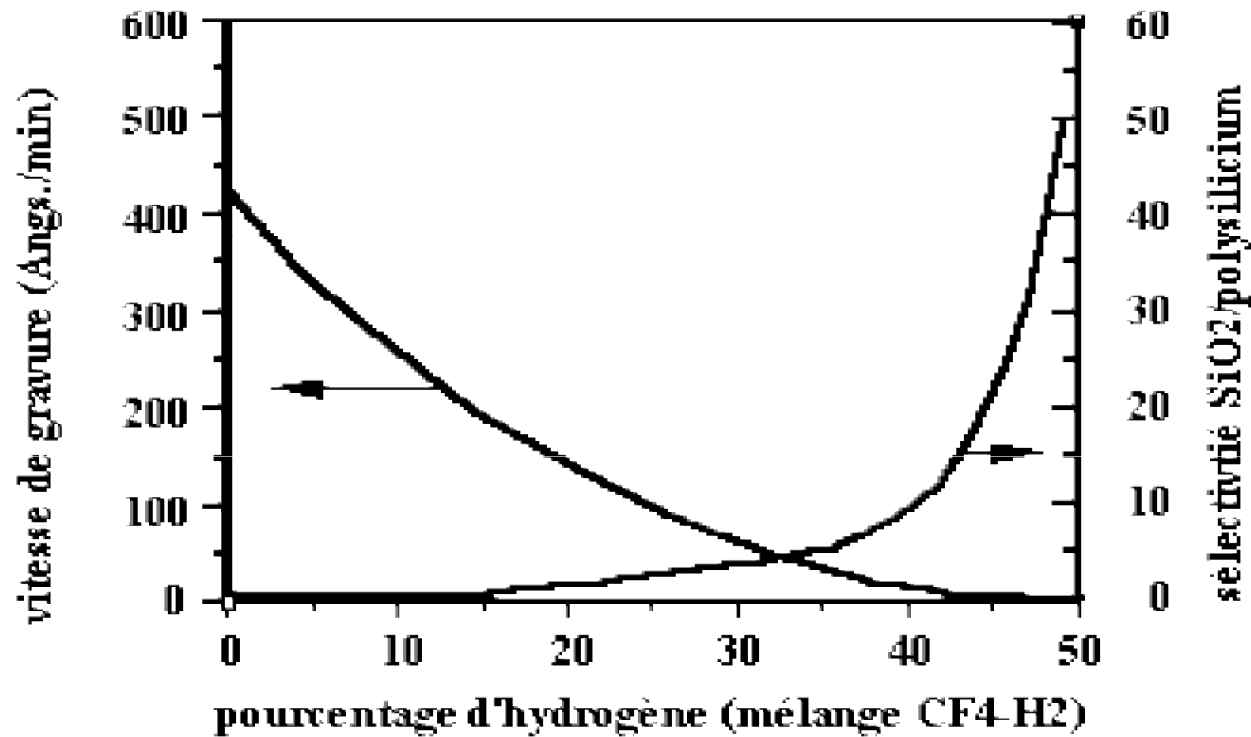


Figure 56 : Vitesse de gravure et sélectivité pour une gravure plasma utilisant du tétrafluorure de carbone dilué dans de l'hydrogène. En fonction de la dilution la sélectivité est modifiée. Elle sera ajustée en fonction des besoins (d'après L.M. Ephrath, [12]).

Suivant les espèces introduites dans le réacteur et suivant la nature de la couche à graver la vitesse d'attaque sera différente.

Il faudra jouer sur la différence des vitesses pour s'assurer d'un bon contrôle de la gravure.

La précision notamment sur la fin de gravure sera d'autant meilleure que la sélectivité sera importante. En effet, il faut pouvoir graver, par exemple, un oxyde sans pour autant éliminer la couche sous-jacente qui peut être, par exemple, la source d'un transistor.

On peut aussi éliminer la couche de silicium polycristallin sur un oxyde. En réglant la proportion des gaz réactifs, on ajuste la sélectivité de la gravure du  $\text{SiO}_2$  par rapport au polysilicium.

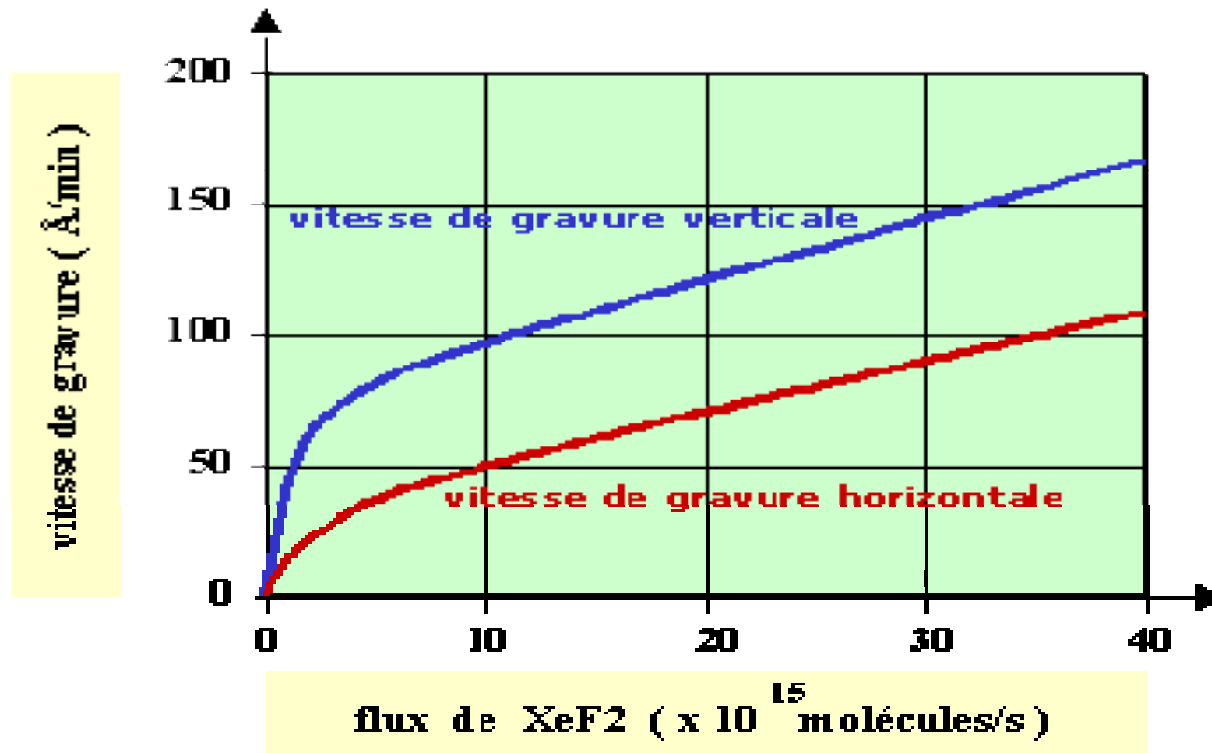


Figure 57 : Vitesse de gravure verticale et horizontale. La différence entre ces deux vitesses due au bombardement d'ions suivant l'orientation verticale, permet de réaliser une gravure anisotropique.

Un réglage astucieux entre l'énergie des ions incidents issus du plasma et le flux des ions chimiquement actifs permet d'obtenir des gravures soit isotropiques soit anisotropiques (figure 57).



Ce type de gravure est particulièrement intéressant dans le cas où l'on veut réaliser des espaceurs de très faible dimension dans les technologies autoalignées.

Ce qui peut représenter, *a priori*, un inconvénient, est exploité astucieusement, pour aller au-delà des limites optiques en précision des motifs (figure 58). En effet, du fait que l'on contrôle parfaitement bien la croissance et donc l'épaisseur des couches, on peut créer des résidus ou espaceurs de largeur très faible, en rapport avec les épaisseurs.

On peut ainsi créer des nouveaux "masques d'implantation" dont l'ouverture est par exemple de 0,2 micron plus large ou plus étroit que le préexistant. Cela sera notamment utilisé pour fabriquer des transistors submicroniques à drain doublement dopé (deux zones de dopage différents).

## Matériau à graver

### Silicium

SF<sub>6</sub>  
CF<sub>4</sub> + O<sub>2</sub>  
HF  
CFCl<sub>3</sub>

### SiO<sub>2</sub>

CHF<sub>3</sub>  
CF<sub>4</sub> + O<sub>2</sub>  
CF<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>  
SiCl<sub>4</sub>

### Siliciure

CCl<sub>4</sub>  
CFCl<sub>3</sub>  
SF<sub>6</sub>  
CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>

En pratique, la différence entre gravure isotropique et anisotropique peut être représentée sur la figure 59.

Il faudra tenir compte de la gravure latérale plus importante dans le cas de la gravure humide. Il est clair que pour les motifs de très petite dimension, il sera préféré une gravure anisotropique.

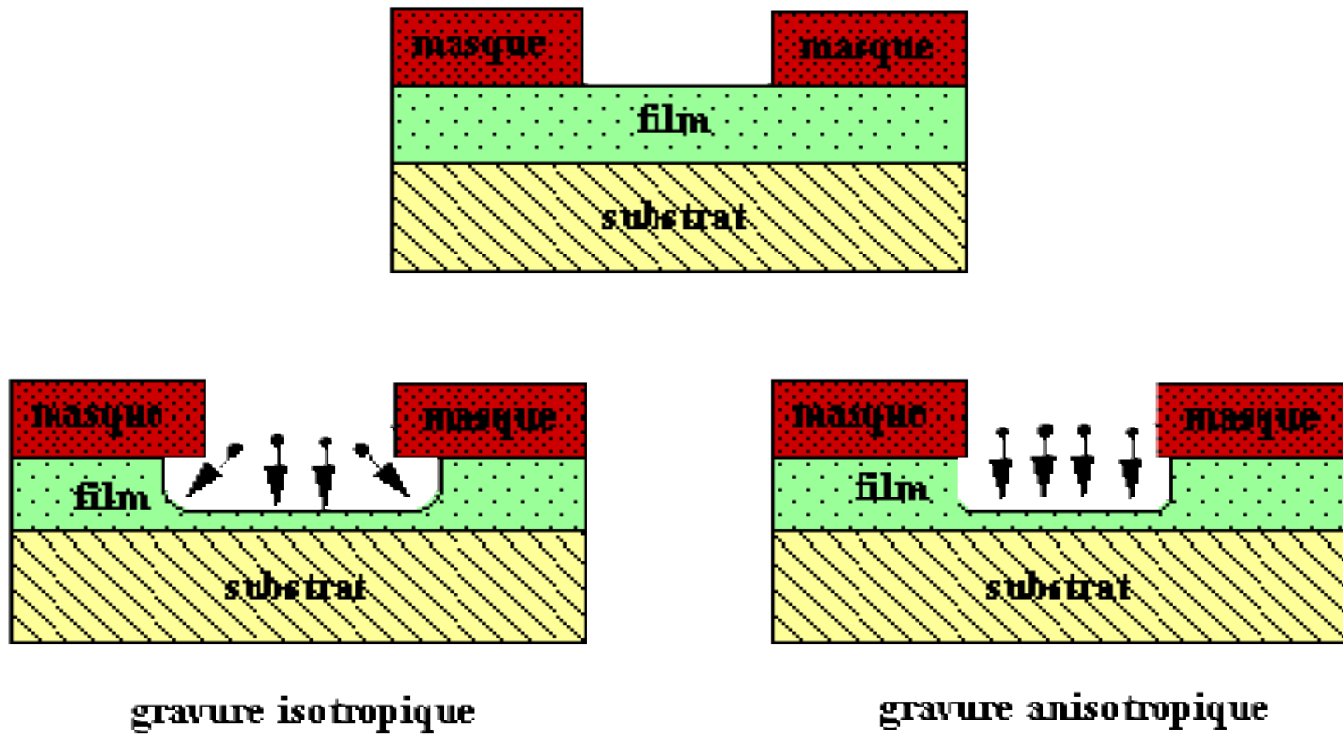


Figure 59 : Différence entre gravure isotropique et anisotropique. La largeur du motif gravé sera différente.

# LA PHOTOLITHOGRAPHIE

## Définition:

Toutes les techniques de procédés technologiques exposées précédemment présentent peu d'intérêt si elles ne se réalisent que pleine plaque. Il faut pouvoir oxyder, doper, métalliser localement suivant des motifs très bien définis et sur des surfaces de plus en plus faibles afin de créer et d'interconnecter des dispositifs élémentaires entre eux.

Le procédé de transfert d'un masque (physique ou logiciel) vers la plaquette s'appelle photolithographie.

Il s'agit d'un procédé photographique qui permet la gravure d'une (ou plusieurs) couche(s) solide(s) telle que nitrure, oxyde, métal, etc..., suivant un motif bien défini.

Nous verrons que la lumière utilisée est en général hors du domaine visible, à savoir en ultraviolet voire en X.

## Principe de la photolithographie:

Les figures [60](#) et [61](#) rappellent le principe du procédé de photolithographie ; l'objectif est de transférer un motif (par exemple un rectangle qui correspondra à une zone de source) réalisé sur masque vers une couche de la plaquette.



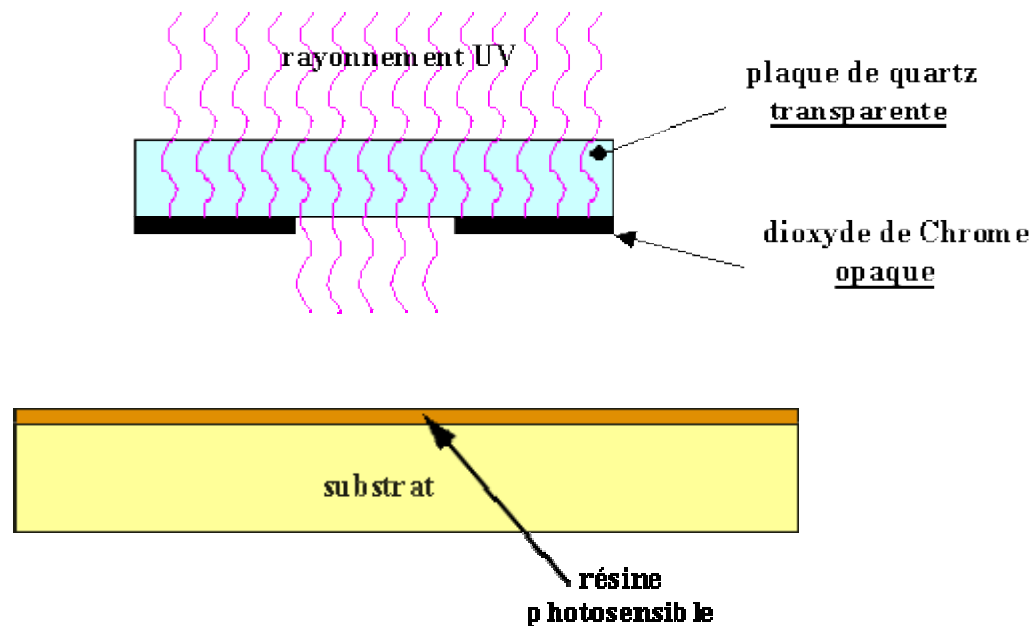


Figure 60 : masque de photolithographie. L'utilisation du quartz est liée à la nature des photons qui sont en général dans le domaine ultraviolet. Le dioxyde de chrome est opaque à ce rayonnement et permet une bonne définition des motifs élémentaires.

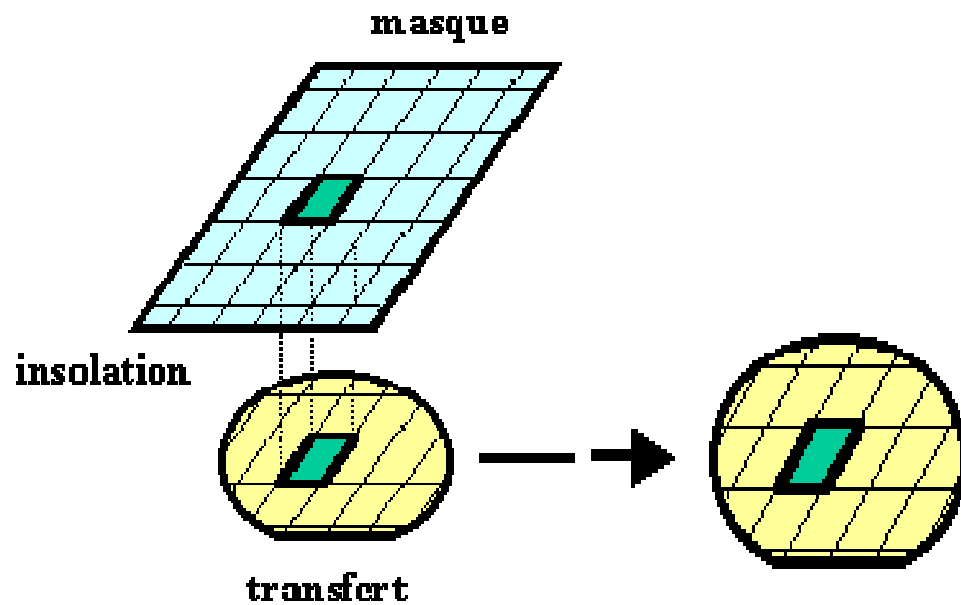


Figure 61 : principe de la photolithographie : par insolation, on transfère vers la plaquette le motif défini sur le masque.

## Réalisation d'un motif sur plaquette:

Dans l'exemple qui suit, nous allons voir comment procéder pour réaliser une zone dopée de type p par implantation ionique dans un substrat de type n. Les différentes étapes élémentaires sont détaillées.

De façon analogue à la technique photographique, on peut utiliser deux types de résine photosensible :

- résine positive,
- résine négative.

## Remarque:

Dans le cas d'une résine positive, on retrouve après l'opération, exactement le même motif sur la couche gravée de la plaquette, que sur le masque de départ. Par exemple, à un motif de métal sur le masque (correspondant à un motif opaque), correspond le même motif d'oxyde restant sur la plaquette après gravure. Dans le cas d'une résine négative, on obtient sur la plaquette le motif complémentaire.

La résine est étalée par une technique de centrifugation. On utilise pour cela une tournette (figure 62) qui aspire la plaquette afin qu'elle ne soit pas éjectée et qui permet, grâce à un réglage de la vitesse de rotation et de l'accélération, d'étaler uniformément la résine.

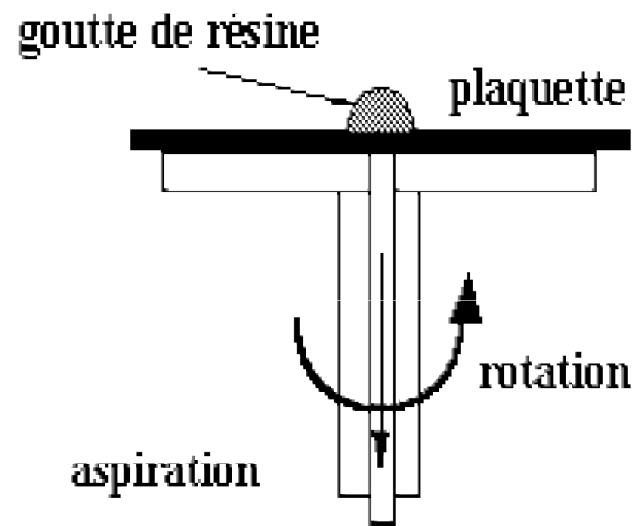


Figure 62 : Tournette pour étalement de résine photosensible. La vitesse de rotation est calculée pour obtenir une couche fine sur toute la surface et d'épaisseur constante.

La figure 63 montre les épaisseurs obtenues pour deux types de résine différents en fonction de la vitesse de rotation (exprimée en tours par minute). Au plus la vitesse de rotation est importante, au plus l'épaisseur du film est faible. Il faut cependant tenir compte de l'accélération pour avoir une bonne homogénéité, les solvants de la résine s'évaporant au fur et à mesure de l'étalement, le coefficient de viscosité variant donc simultanément.

Cela sous-entend un étalonnage précis qui est en fait une opération longue et délicate.

On utilise en général les indications fournies par le fournisseur de résine mais l'environnement, pression partielle des gaz volatiles par exemple, joue un rôle important.



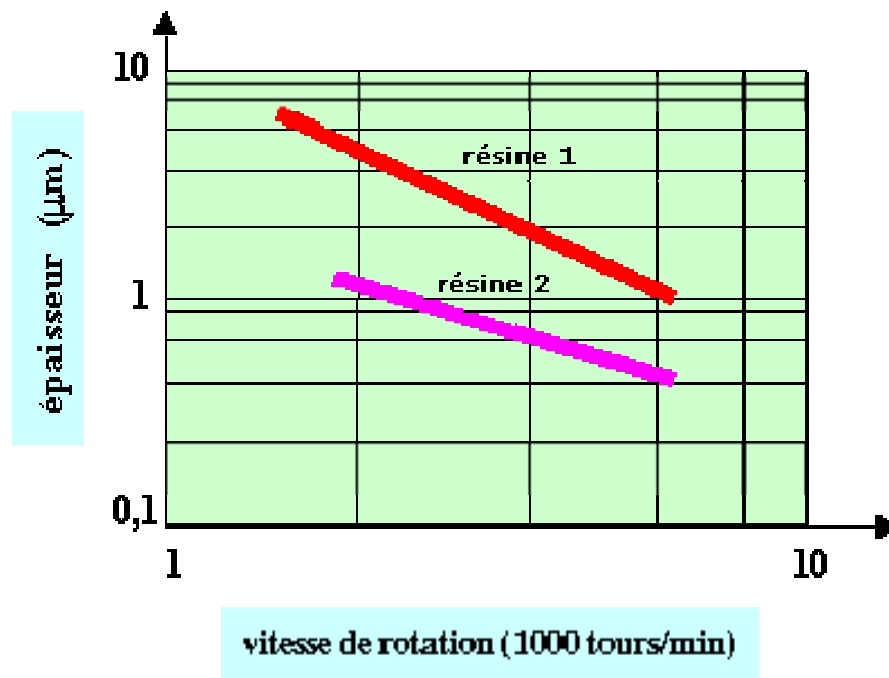


Figure 63 : épaisseur obtenue de résine photosensible en fonction de la vitesse de rotation pour deux résines différentes

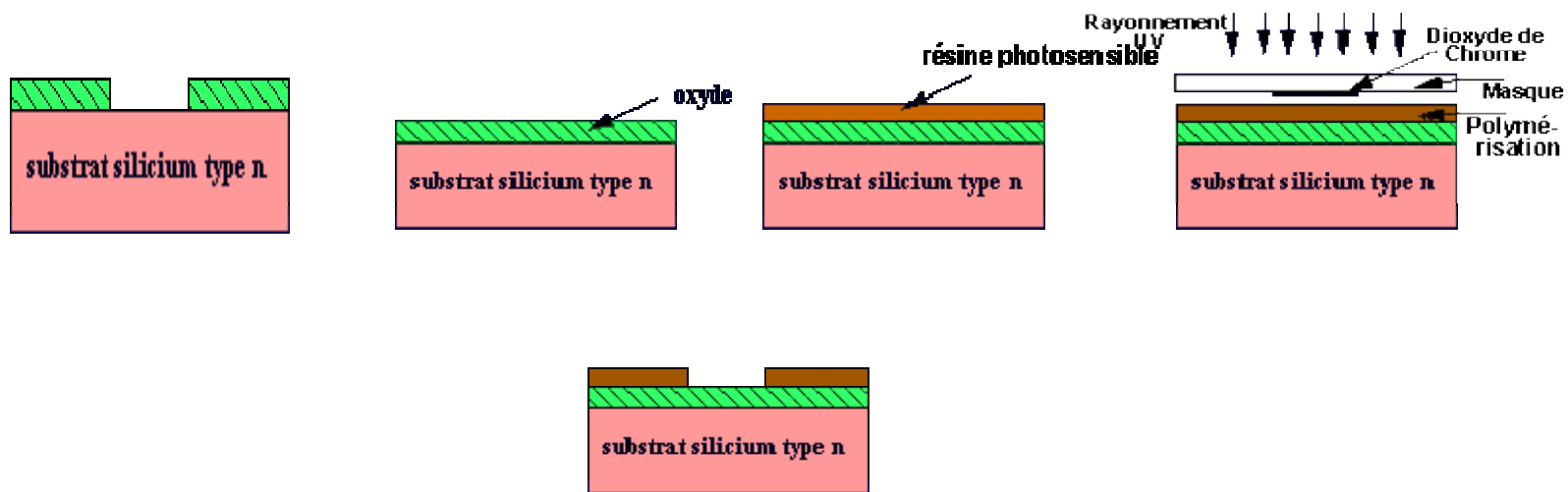


Figure 64 : principe de la photolithographe. Le motif du masque a été transféré vers la plaquette. La résine est négative dans ce cas.

Après une oxydation et différents nettoyages, on étale la résine photosensible sur la plaquette à l'aide de la tournette.

La résine est ensuite séchée (on élimine les produits les plus volatiles) puis insolée à travers le masque. Les motifs sont alors révélés par un révélateur.

Après rinçage, une cuisson durcit la résine qui peut alors résister aux attaquants chimiques tels que l'acide fluorhydrique. La gravure humide par le HF attaque la couche d'oxyde non protégée par la résine.

La résine est ensuite retirée de la surface par un solvant chimique puissant tel que l'acétone. Dans certains cas, il faudra utiliser des techniques encore plus efficaces telles que la gravure par plasma d'oxygène ; cette méthode est régulièrement utilisée dans les technologies submicroniques pour lesquelles la résine est aussi utilisée comme couche de masquage d'implantation ionique.

# PROCEDES DE FABRICATION

## Nettoyage des substrats et plaquettes:

L'opération de nettoyage est indispensable avant chaque étape technologique principale et correspond elle aussi à une longue suite d'opérations élémentaires. En effet, si une plaquette ou un substrat a attendu entre deux étapes majeures, il faut procéder à un dégraissage et un décapage de la surface en éliminant l'ensemble des impuretés ainsi que l'oxyde natif du silicium qui se forme automatiquement s'il n'est pas recouvert d'une couche protectrice.

- 3 min dans un bain de trichloroéthylène chaud (dégraissage),
- 3 min dans un bain d'acétone (pour enlever le trichloroéthylène),
- 3 min dans de l'alcool éthylique (pour enlever l'acétone),
- 5 min dans de l'eau désionisée,

- 10 min dans la solution basique SC1 ( $3 \text{NH}_4\text{OH} + 7\text{H}_2\text{O} + 3\text{H}_2\text{O}_2$ ) à ébullition (élimine les impuretés organiques en régénérant l'oxyde natif),
- 5 min dans de l'eau désionisée,
- 10 min dans la solution acide ( $\text{HCl} + 6 \text{H}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}_2$ ) à ébullition (élimine les impuretés métalliques en régénérant l'oxyde natif),



- 5 min dans de l'eau désionisée,
- 1 min dans de l'acide fluorhydrique (élimination de l'oxyde natif)
- 5 min dans de l'eau désionisée.

Cet ensemble d'opérations est renouvelé autant que nécessaire au cours du procédé complet de fabrication.

## Nécessité de propreté : salle blanche :

Il faut avant tout se rappeler que le principal souci en cours de fabrication sera la propreté. Une seule poussière de dimension micronique se déposant sur une plaquette peut rendre inutilisable une puce de plusieurs millions de transistors.

Ainsi, toute fabrication s'effectuera dans une salle blanche, salle dont l'atmosphère est contrôlée en température et humidité et dont le nombre de particules de poussières doit être le plus faible possible.

Il faut éviter toute introduction de poussière, en particulier par les opérateurs et personnels. C'est la raison pour laquelle, toute personne entrant en salle blanche doit être entièrement équipée de vêtements spéciaux (qui ne "peluchent" pas), de gants, cagoules, surchaussures ou chaussures spéciales, etc... Une "douche d'air", pouvant durer plusieurs minutes, prise dans le sas d'entrée est nécessaire.

Il est donc clair que tous les équipements permettant d'effectuer le travail des plaquettes seront installés en salle blanche ou dans des enceintes à atmosphère rigoureusement contrôlée.

## Réalisation d'une diode :

Nous allons donner les principales étapes permettant de fabriquer une diode à jonction pn :

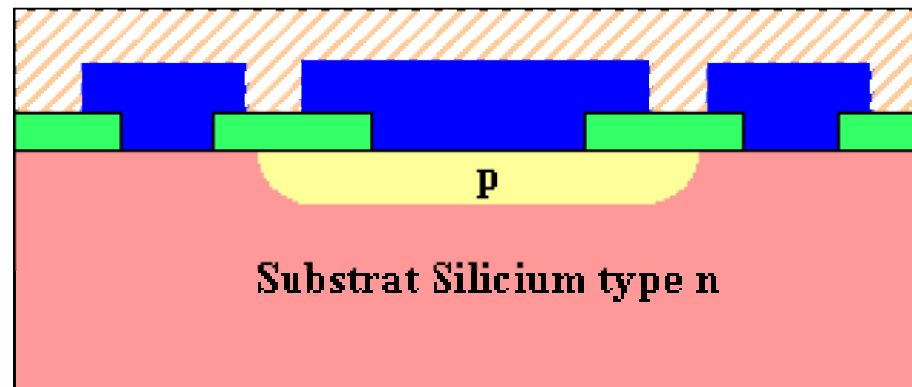


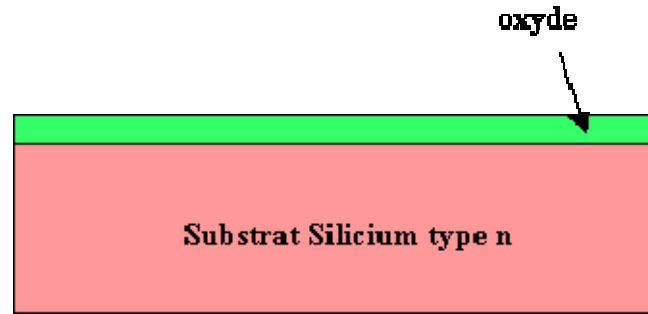
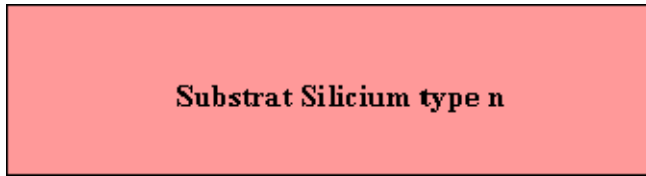
Figure 71 : Réalisation d'une diode

- nettoyage du substrat,
- oxydation épaisse humide pour fabriquer un masque de diffusion,
- photolithographie 1, d'ouverture de l'anode,
- implantation de Bore,
- diffusion-recuit d'implantation,

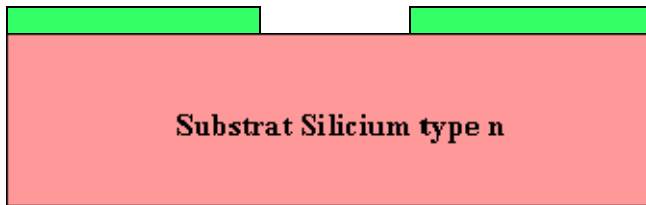
- oxydation thermique humide,
- photolithographie 2, d'ouverture de contacts,
- dépôt d'Aluminium,



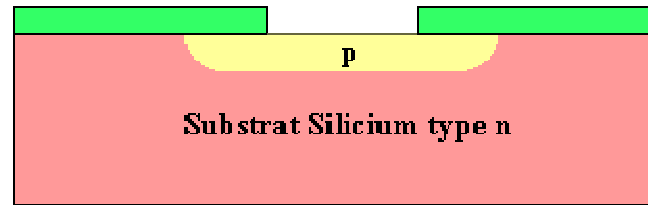
- photolithographie 3, des contacts,
- recuit sous forming-gas (mélange d'azote et d'hydrogène à 10%) pour améliorer les contacts.
- dépôt de verre de passivation (verre de Bore),



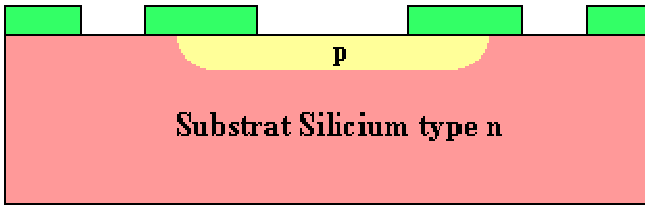
oxydation humide



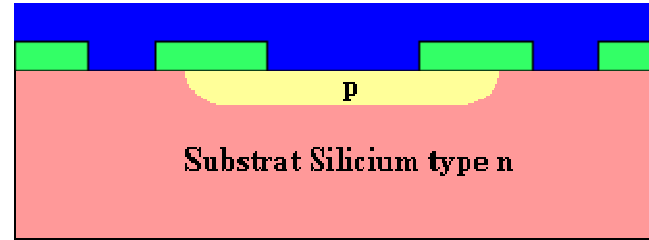
photolithogravure 1



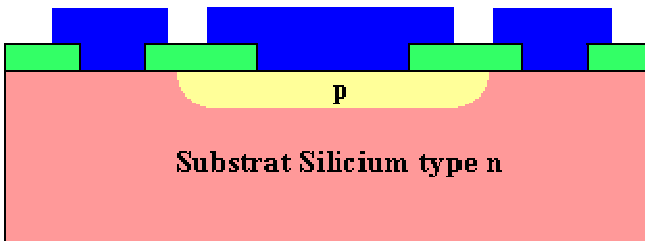
implantation



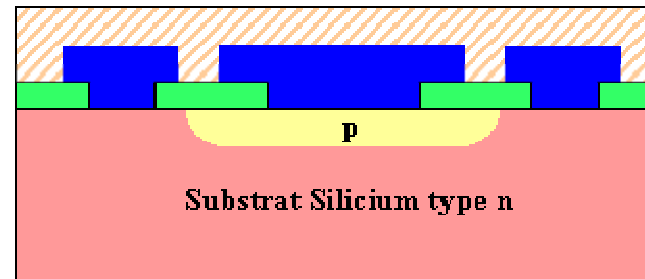
Ouverture fonctions de contact



dépôt d'Aluminium



photolithogravure 3



dépôt verre de Bore