

Technologie des dispositifs électroniques

Chapitre II

Introduction

La fabrication des dispositifs électroniques nécessite des matériaux semiconducteurs de haute qualité afin d'obtenir des meilleures performances. La forme de ces matériaux semiconducteurs dépend de leur rôle dans les dispositifs électroniques. Ces matériaux peuvent être monocristallin, polycristallin, massifs, couches minces, ...etc. La taille et la qualité des semiconducteurs dépendent fortement de la méthode par laquelle ils sont préparés.

2.1. Cristallogenèse du Silicium

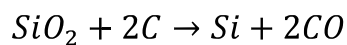
Le silicium est aujourd'hui une marchandise, son prix est soumis à la loi de l'offre et de la demande dans un marché extrêmement concurrentiel, ce qui a conduit au développement de procédés à haut rendement pour les matériaux à tolérance serrée exigés. Alors que la fabrication de dispositifs simples et de puissance nécessite du silicium de haute pureté préparé par la méthode de la zone flottante et dopé par transmutation neutronique (NTD), la fabrication de circuits intégrés consomme plus de 75 % de tout le silicium semiconducteur produit. Les ventes de semiconducteurs a connaît une augmentation rapide depuis le début les années 1990. La large production de ce matériau est assurée grâce au développement de la croissance cristalline de Czochralski, dont le poids de lingots produises est passée de quelques centaines de grammes, environ 1962, aux unités actuelles de 60 kilogrammes et plus.

2.1.1. Le silicium du grade métallurgique (Si-MG)

La source du silicium brut utilisé pour la fabrication des dispositifs à semiconducteurs est du silicium de qualité métallurgique, fabriqué par le processus de la carboréduction de la silice (SiO_2) dans un four électrique à arc. La silice de laquelle est obtenu le silicium métal est extraite en carrière. Elle provient principalement de gisements primaires ou détritiques de quartz. Cependant, les roches utilisées doivent répondre à des critères particuliers de composition ($\text{SiO}_2 > 98\%$, faibles teneurs en oxyde de fer, plomb, alumine, et TiO_2), de granularité (diamètre $> 15\text{ mm}$), et de friabilité, pour pouvoir être utilisées en métallurgie. Généralement, les types de gisements les plus exploités sont les galets de quartz, les quartzites, et les filons de quartz. Aussi, certains grès très riches en silice sont également exploités.

Le silicium est le deuxième élément le plus abondant, après l'oxygène, mais n'existe pas naturellement sous sa forme élémentaire (élément seul isolé). La Silice, libre comme dans le quartz ou sous les nombreuses formes de silicate dans les roches ignées, constitue environ un quart de la croûte terrestre. Cependant, les producteurs de silicium exigent une pureté de minéral de SiO_2 supérieure à 99 % et imposent également des restrictions strictes sur les concentrations admissibles de diverses impuretés présentes en particulier l'arsenic, le phosphore et le soufre de sorte que souvent, seule une petite fraction du SiO_2 produise répond à leur spécification de pureté.

Dans le procédé traditionnel du four à arc électrique (Fig.58), qui a été utilisé pendant la majeure partie de XX siècle, le quartzite en morceaux réagit avec du carbone, en tant que réducteur, sous forme de charbon, de coke ou de charbon de bois, qui peut être une source d'au moins un ordre de grandeur de niveaux d'impuretés supérieurs à ceux présents dans la silice. La réaction globale semble simple :



Cependant, comme discuté par Healy (1970), la séquence de réaction réelle dans les différentes zones de température du four est beaucoup plus complexe que cela, comme indiqué dans le diagramme schématique de la figure suivante

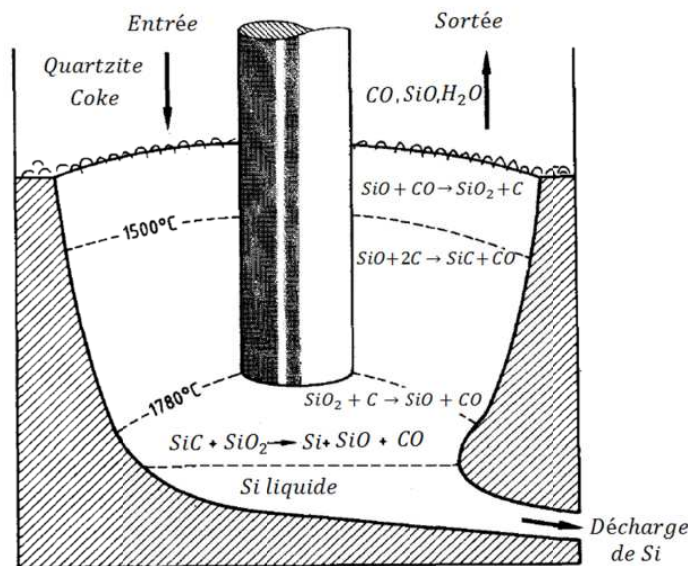
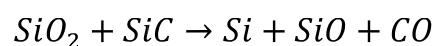
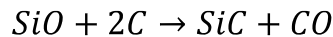


Figure 58 : Principe de base de la croissance du silicium MG dans un four à arc.

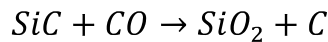
- Dans la partie inférieure du four, dans la région de l'arc entre les électrodes où la température peut dépasser 2000°C , le silicium est produit par la réaction



- Au-dessus de cela, à une température un peu plus basse, autour de 1700-1500°C, les gaz produits ascendants réagissent pour former le carbure de silicium (SiC) selon la réaction



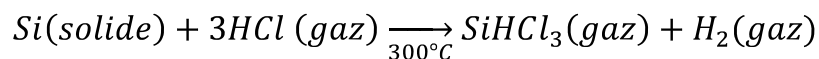
- Plus près du sommet, où la température descend en dessous de 1500°C, comme on s'y attend thermodynamiquement, la réaction inverse prédomine :



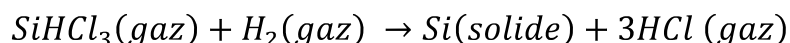
Les matériaux entrants sont introduits dans le haut du four, tandis que le silicium liquide est périodiquement prélevé par le bas et coulé en lingots. Notons ici qu'avant d'être coulé en lingots, le silicium métal liquide subit un premier affinage par ajout de laitiers. Ces laitiers oxydent les impuretés principales (généralement Al et Ca) en les solidifiant, ce qui permet de les retirer du silicium liquide. Les lingots solidifiés sont versés sur le sol ce qui donne des fragments de silicium de qualité MG.

2.1.2. Le silicium polycristallin (polysilicium poly-Si)

Le procédé précédent produit du silicium de qualité métallurgique d'une pureté d'environ 98 %. Ensuite, le silicium est pulvérisé et traité avec du chlorure d'hydrogène (HCl) pour former du trichlorosilane (SiHCl₃) selon la réaction



Le trichlorosilane est un liquide à température ambiante (point d'ébullition 32°C). La distillation fractionnée du liquide élimine les impuretés indésirables. Par la suite, Le SiHCl₃ purifié est utilisé dans une réaction de réduction à l'hydrogène pour préparer le silicium de qualité électronique (EGS) :



Cette réaction a lieu dans un réacteur contenant un barreau de silicium chauffé par résistance à plus de 1100°C, qui sert de point de nucléation pour le dépôt de silicium. Le produit final ici (EGS electronic-grade silicon) est un matériau polycristallin de haute pureté sous forme de cylindre qui sera par la suite utilisé comme matière première pour préparer du silicium monocristallin de haute qualité désigné pour la fabrication des dispositifs électroniques.

2.1.3. Le silicium monocristallin

Le monocristal de silicium peut être préparé à partir du silicium polycristallin par différentes méthodes telles que ; Czochralski, la zone fondue, ...).

La technique de Czochralski est la méthode la plus utilisée dans le cas de Si. Elle utilise un appareil appelé extracteur de cristal. Cet extracteur a trois composants principaux : (a) un four,

qui comprend un creuset en silicium fondu (SiO_2), un suscepteur en graphite, un mécanisme de rotation (dans le sens des aiguilles d'une montre), un élément chauffant et une alimentation électrique. Le creuset tourne pendant la croissance pour éviter la formation de régions localement chaudes ou froides. (b) un mécanisme de tirage de cristal qui comprend un porte-germe et un mécanisme de rotation (dans le sens inverse des aiguilles d'une montre). (c) un contrôle d'atmosphère qui comprend une source de gaz (telle que l'argon pour empêcher la contamination du silicium fondu), un contrôle de débit et un système d'échappement. De plus, l'extracteur dispose d'un système de contrôle global basé sur un microprocesseur pour contrôler les paramètres de processus tels que la température, le diamètre du cristal, le taux de traction et les vitesses de rotation, ainsi que pour permettre des étapes de processus programmées.

Dans le processus de croissance du cristal, du silicium polycristallin (EGS) est placé dans le creuset et le four est chauffé au-dessus de la température de fusion du silicium (1412°C). Un cristal germe convenablement orienté (par exemple, $\langle 111 \rangle$) est suspendu au-dessus du creuset dans un porte-germe. Le germe est inséré dans le bain de silicium fondu. Une partie fond, mais la pointe du cristal germe restant touche toujours la surface du liquide. Le silicium fondu adhérant au cristal gèle ou se solidifie, en utilisant le réseau du cristal germe comme modèle. Le refroidissement progressif à l'interface solide-liquide donne un grand monocristal. Le dopage du matériau peut être réalisé en ajoutant la concentration d'impuretés souhaitée à la masse fondue avant la croissance cristalline.

2.2. Elaboration des monocristaux des composés semiconducteurs

Les techniques de croissance principales des monocristaux des composés semiconducteurs peuvent facilement être regroupées en quatre catégories: Croissance horizontale (HG), croissance verticale (VG), tirage en cristal et Czochralski à liquide encapsulée (LEC). Bien que cette classification distingue les techniques de la disposition physique des différents processus de croissance, il est très important d'apprécier que chaque technologie donne lieu à différentes conditions de cristallisation qui affectent la qualité et l'efficacité de la production des matériaux III-V. Des facteurs tels que la facilité d'utiliser un germe pour la croissance cristalline, la forme cristalline, l'effet de la croissance dans un volume contraint, les gradients de température, la visibilité et l'économie de la production et de la facilité d'automatisation sont des facteurs critiques dans le choix d'une technologie particulière. L'adéquation de ces techniques pour des composés particuliers (Tableau 1-2) a évolué avec le temps et l'expérience. Ils ont tous été affinés

pour des applications particulières et sont toujours en cours de recherche et de développement commercial.

Composé	Zone fondue Horizontal Bridgmann	VGF vertical Bridgmann	Tirage vertical	LEC	Phase vapeur
InSb	+	Possible	+		possible
GaSb	+	Possible	+		possible
InAs	+	possible		+	possible
GaAs	+	+		+	possible
InP	-	+		+	possible
GaP	-	+		+	possible
HgSe		+			possible
HgTe		+			possible
CdSe	-	+			+
CdTe	+	+			+
ZnSe		+			+
ZnTe		+			+
HgS					+
ZnS					+
CdS					+

a. La croissance horizontale (HG)

La croissance horizontale (HG) est ici utilisée pour couvrir toutes les techniques de cristallisation horizontale. Elle représente un sous-ensemble des technologies de fusion de zone décrites par Pfann (1966). Un arrangement de croissance horizontale typique est représenté schématiquement sur la figure 59. La croissance d'un monocristal peut être réalisée par refroidissement contrôlé d'un lingot de semiconducteur fondu dans une nacelle.

Un lingot monocristallin est obtenu en utilisant un germe monocristallin de haute qualité qui entre initialement en contact avec la masse fondue. La technique est souvent appelée technique Bridgman horizontale lorsque le lingot est retiré du four de croissance. Pour minimiser les

perturbations mécaniques du lingot et du processus de cristallisation, le four peut être déplacé par rapport au lingot.

Dans le cas des composés semiconducteurs, les problèmes principaux concernent généralement la nécessité de contrôler avec précision les profils thermiques, d'où le mouvement des grands fours a tendance à être indésirable. L'une des solutions proposées pour éviter ce problème est l'utilisation des fours avec des enroulements contrôlables de manière à ce que le profil thermique puisse être déplacé.

L'attrait de la méthode HG provient de sa relative simplicité et facilité d'automatisation. Le procédé peut être appliqué facilement aux composés qui peuvent être traités dans la silice vitreuse, c'est-à-dire pour les composés à température de fusion inférieure à 1250°C et ayant des pressions de vapeur au point de fusion ne dépassant pas 1atm.

Un autre avantage de la méthode HG est qu'elle peut être utilisée pour croître des composés semiconducteurs sous forme de lingot qui peut ensuite être purifié par la méthode de la zone fondue dans le même appareil. Un tel lingot peut être préparé sous forme d'un monocristal comme il peut être polycristallin.

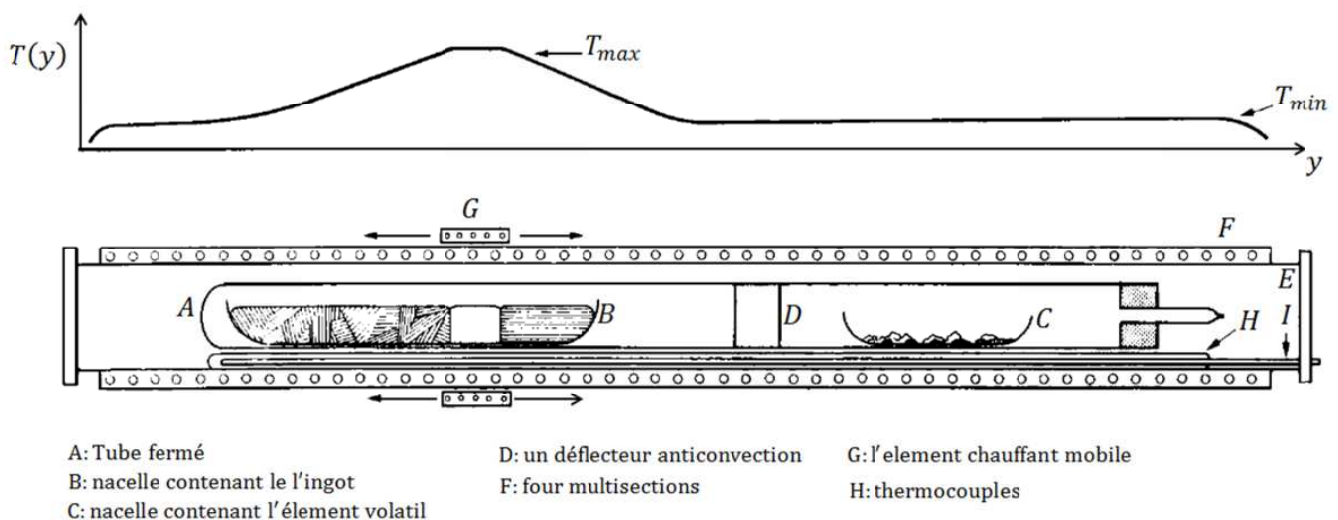


Figure 59 : Principe de base de la méthode HG (croissance horizontale).

Un avantage important de la technique HG est que sa conception permet facilement l'établissement de faibles gradients de température à l'interface solide-liquide sans créer de problème de contrôle. Ceci est complètement différent du cas de processus de tirage où des gradients de température relativement élevés sont nécessaires pour maintenir le contrôle de la forme du cristal. Les faibles gradients de température sont extrêmement importants pour minimiser le glissement induit par la contrainte lors de la cristallisation et donc pour minimiser la

formation des dislocations. Dans le cas de la croissance HG de GaAs, il est possible de faire croître un matériau à faible densité de dislocations, typiquement autour de 10^2 dislocations/cm², 100 fois moins que celle observée dans les cristaux préparés par la méthode LEC à tirage vertical. Ceci est très important pour les diodes laser à base de GaAs, où même une seule dislocation peut facilement entraîner une défaillance de l'appareil.

Cependant, les techniques horizontales présentent des inconvénients tels que le contrôle de la direction de croissance, les contraintes, la surfusion, la contamination, et la forme des monocristaux.

b. La méthode de Croissance verticale (VG)

La cristallisation des lingots dans un tube celé vertical par les techniques Stockbarger ou Bridgman verticale était autrefois associée à la croissance de matériaux optiques monocristallins de haute qualité comme le CaF₂. Mais, plus tard, la technologie a été affinée et développée en tant que technique de gel à gradient vertical pour la croissance de GaAs, InP et GaP (Gault et al., 1986; Clemens et al., 1986; Bourret, 1990).

L'application avec succès de la technique VGF (vertical Gradient freeze) à la croissance de GaAs s'est produite en réponse au besoin de trouver une solution rentable pour la production de plaquettes de GaAs uniformes et compatibles avec la technologie des circuits intégrés. Rappelez-vous qu'il s'agit ici d'un besoin pour des plaquettes circulaires ayant des dimensions précises et une très bonne uniformité électrique.

La croissance de lingots de GaP, InP et GaAs de grand diamètre par la méthode VGF a été rapportée. Cela a été réalisé sans l'utilisation d'un encapsulant de B₂O₃.

Le type d'appareil est illustré dans Fig.60. Cependant, il apparaît que pour la croissance reproductible de GaAs il est nécessaire d'utiliser un creuset de BN avec un encapsulant B₂O₃.

La technique de refroidissement graduel vertical (VGF) implique le refroidissement contrôlé de bas au haut d'un matériau fondu contenu dans un récipient vertical en forme de tube. Le refroidissement est réalisé non par le mouvement du four par rapport au tube, mais par l'utilisation d'un four comprenant des éléments chauffants séparés commandés indépendamment. En réglant les éléments chauffants, nous pouvons contrôler le profil thermique appliqué afin que le déplacement de l'interface liquide-solide sera doucement et donc provoquera la cristallisation du lingot.

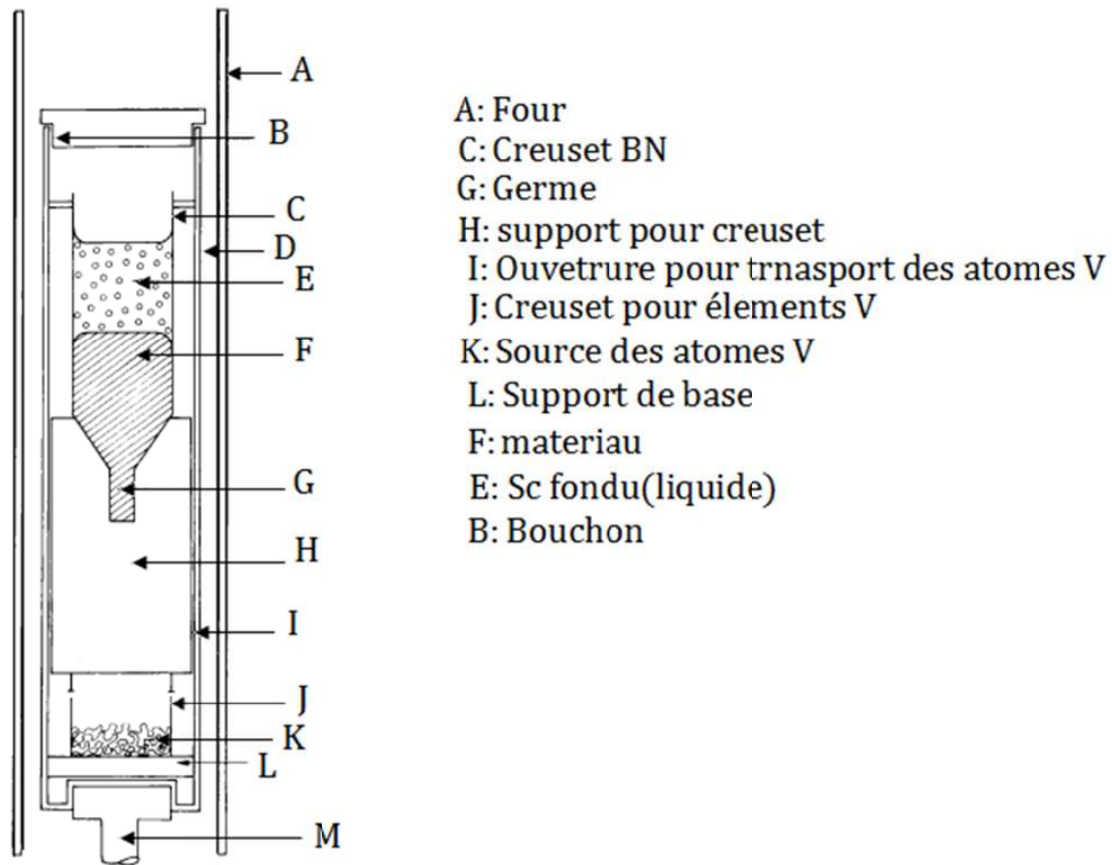


Figure 60 : Principe de base de la méthode VG (croissance verticale).

La technique fournit deux conditions de croissance importantes. D'un part, elle est bien adaptée à des faibles gradients de température, ce qui à leur tour favorise de faibles densités de dislocations. D'autre part, elle fournit un lingot de forme idéale et du diamètre requis. Si la forme de l'interface est plate ou si la surface de croissance est légèrement convexe, le problème d'expansion durant le refroidissement ne semble pas être sérieux et toute contrainte peut être supprimée par la suite par recuit. Les principaux problèmes de cette méthode semblent être ceux liés aux difficultés de conception des fours thermiques, au choix du matériau de la nacelle (le BN est généralement utilisé), et au choix des conditions permettant la germination et la croissance des cristaux [100] sans maillage.

c. La méthode de Czochralski à encapsulation liquide (LEC)

L'encapsulation liquide, souvent appelée technique de Czochralski à encapsulation liquide (LEC), est une technique qui évite le besoin de parois chaudes et permet l'utilisation de tiges de traction conventionnelles. Elle implique l'utilisation d'une couche inerte de liquide transparent, généralement du B_2O_3 , qui flotte à la surface de la masse fondue, agit comme un joint liquide et

empêche la perte du composant volatil dissociant à condition que la pression du gaz externe P_G , soit supérieure à celle de la tension de vapeur de dissociation P_d , du composant volatil.

D'autre part, Le matériau d'encapsulation doit posséder des propriétés supplémentaires. Il doit être non miscible à la masse fondue et non réactif vis-à-vis de celle-ci. Mais, plus important encore, l'encapsulant doit mouiller le cristal et le creuset.

d. Transport chimique en phase vapeur (CVT)

Dans cette technique, le matériau du départ $M(s)$ est généralement sous forme d'une poudre et il est placé dans un tube fermé. L'extrémité de tube qui contient cette poudre est à la température T_2 tandis que l'autre extrémité est à T_1 (avec $T_1 < T_2$). L'addition au solide $M(s)$ d'un agent de transport $X_2(g)$, qui est volatil à la température moyenne de tube et qui peut réagir avec le matériau M pour former la phase gazeuse $MX(g)$, permet le transport de M de l'extrémité chaude vers l'extrémité froide.

L'extrémité chaude (T_2): $M(s) + \frac{1}{2} X_2(g) = MX(g)$

L'extrémité froide (T_1): $MX(g) = M(s) + \frac{1}{2} X_2(g)$

e. Epitaxie en phase liquide (LPE)

La méthode d'épitaxie en phase liquide consiste à croître un matériau sous pression atmosphérique par la mise en contact direct d'un substrat ou d'un germe avec une source liquide d'espèces réactives. A la fin de l'opération, nous obtiendrons de même nature ou de réseau cristallin très voisin à celui du substrat ou du germe.

Contrairement à d'autres méthodes d'épitaxie, la méthode LPE est une méthode qui déroule en équilibre thermodynamique. La structure et la composition de la couche déposée dépendent de l'orientation du substrat et du diagramme d'équilibre de matériau à croître.

2.3. Techniques de croissance

2.3.1. Méthode de Czochralski

La méthode de tirage de Czochralski (Fig.61) est la méthode la plus courante et la plus avancée pour la croissance de monocristaux semiconducteurs. Le processus porte le nom du scientifique polonais Jan Czochralski, qui a découvert la méthode en 1916 alors qu'il étudiait les taux de cristallisation des métaux. Elle consiste à cristalliser un matériau à partir de sa phase liquide. Le procédé de croissance est le suivant : on place le matériau que l'on cherche à cristalliser dans un creuset résistant à des très hautes températures puis on maintient le creuset à une température à peine supérieure à la température de fusion. Par la suite, nous trempions à la surface du bain fondu

un germe monocristallin du cristal à obtenir. Une partie fond, mais la pointe du cristal germe restant touche toujours la surface du liquide. Il est ensuite retiré lentement de la masse fondue. Le matériau fondu apporté dans le creuset se solidifie autour du germe légèrement plus froid, en utilisant le cristal du cristal germe comme modèle. La congélation progressive à l'interface solide-liquide donne un grand monocristal. La concentration d'impuretés souhaitée est obtenue en ajoutant des impuretés à la masse fondue sous forme de silicium fortement dopé avant la croissance cristalline.

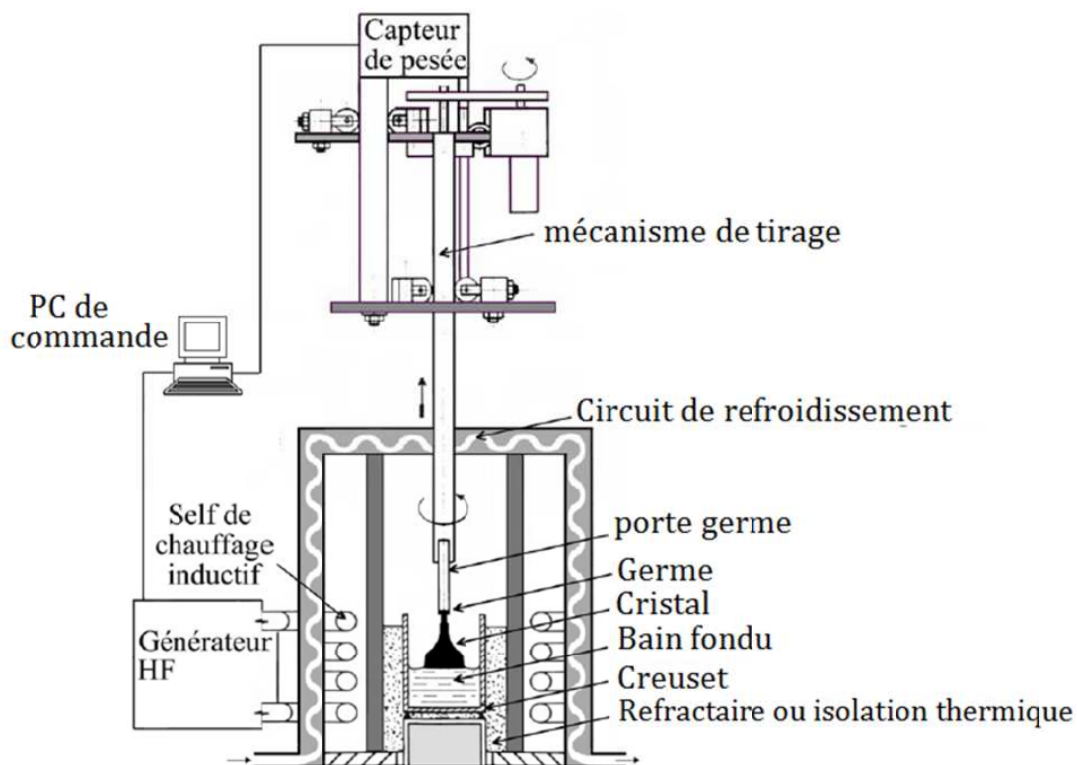


Figure 61 : Principe de la méthode de Czochralski.

Les vitesses de croissance utilisées dans la technique Czochralski sont de l'ordre de quelques mm/heure pour les matériaux non dopés. Dans le cas du dopage, des vitesses plus faibles de l'ordre de quelques dixièmes de mm/heure sont nécessaires pour éviter les phénomènes locaux de surfusion et pour assurer une distribution homogène des dopants.

2.3.2. Méthode de Bridgman-Stockbarger

Cette méthode est une variante de la méthode fusion de zone. Contrairement au cas de la méthode de Czochralski qui nécessite l'utilisation d'un germe pour la croissance, l'utilisation d'un germe dans la méthode de Bridgman-Stockbarger n'est pas nécessaire. Cette méthode consiste à abaisser lentement un bain fondu dans un gradient de température assuré par un four spécial. Ce four

contient au moins deux zones, la zone supérieure est une zone chaude dont la température est légèrement supérieure à la température de fusion du matériau à cristalliser, et la deuxième zone est une zone froide. La présence de ces zones assure un gradient thermique unidirectionnel. La figure 62 illustre le principe de base de la méthode de Bridgman-Stockberger. Notons ici que l'appellation Bridgman-Stockberger est liée à l'utilisation des creusets verticaux.

Initialement le matériau à cristalliser est placé dans un creuset vertical qu'on le place dans la zone chaude du four. Comme la température de cette zone est légèrement supérieure à la température de fusion du matériau, le matériau devient entièrement liquide. Par la suite le creuset est translaté lentement à l'aide d'une tige support dans une zone froide où le cristal se solidifie. Le creuset utilisé dans cette méthode présente une base conique en pointe, ce qui permet un bon contrôle du début de la croissance du matériau. De plus, pour assurer l'obtention d'un monocristal, un germe peut être placé dans un appendice situé à la pointe du creuset. Pour assurer un bon gradient thermique dans le four est par conséquent une interface solide-liquide la plus homogène possible, un écran thermique peut être utilisé pour délimiter les deux zones.

Le type de four à utiliser pour le chauffage dépend de la nature du matériau à cristalliser et des conditions de croissance (température du départ, ...). Il existe des fours résistifs qui utilisent des résistances en graphite par exemple pour le chauffage, comme il y a des fours à induction magnétique (RF, ...). La vitesse de translation est généralement de l'ordre de quelques millimètres par heure.

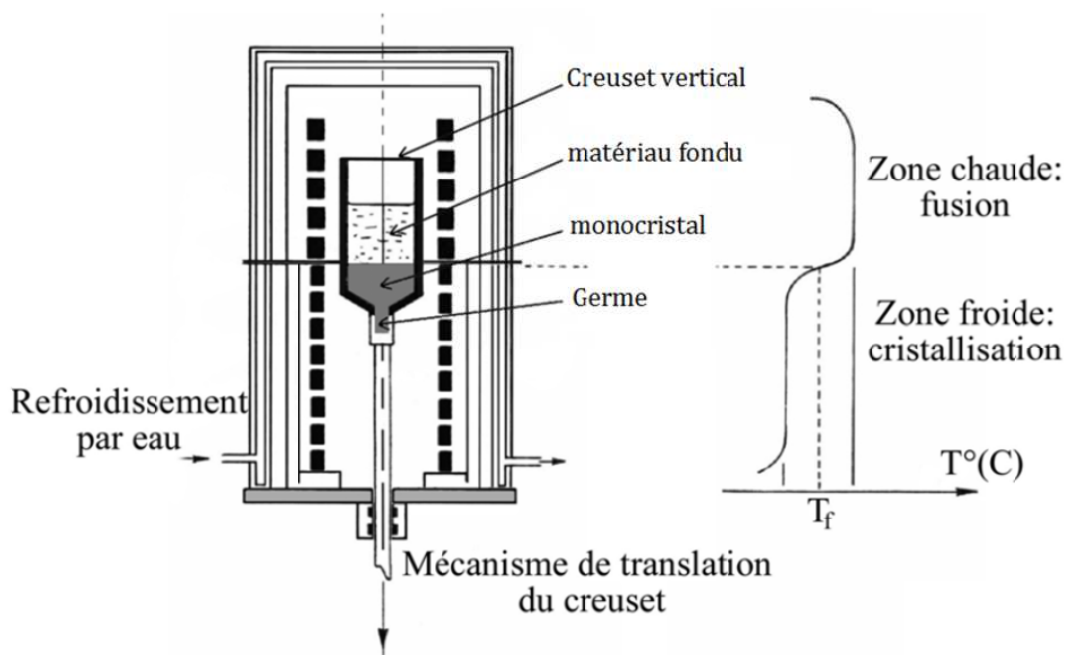


Figure 62 : Principe de la méthode Bridgman-Stockberger.

2.3.3. Méthode de la zone flottante

La méthode de la zone flottante appelée aussi la méthode de fusion de zone est une méthode dérivée de la méthode Bridgman et elle est surtout considérée comme une méthode de purification des matériaux. Cependant, elle est aussi utilisée pour la croissance des monocristaux comme dans le cas par exemple du silicium. Dans ce cas, le matériau du départ est un matériau polycristallin préparé généralement sous la forme d'un barreau (Fig.63). Ce barreau avec un cristal germe au fond est monté verticalement (horizontalement dans une alternative méthode) sur un support. Le barreau peut être enfermé à l'intérieur d'un tube de quartz dans lequel un gaz inerte peut être utilisé. A l'aide d'un système de chauffage adéquat, une petite zone du barreau (quelques centimètres de longueur) est maintenue en fusion et elle est déplacée de la graine vers le haut de sorte que cette zone flottante traverse la longueur du barreau. Le matériau fondu est retenu par la tension superficielle entre les faces de matériau solide en fusion et en croissance. Au fur et à mesure que la zone flottante se déplace vers le haut, un matériau monocristallin se solidifie par refroidissement à l'extrémité de la zone en retrait et se développe comme une extension du germe. Comme cette méthode n'utilise pas de creuset, considéré généralement comme source de contamination, elle fournit des cristaux de haute pureté.

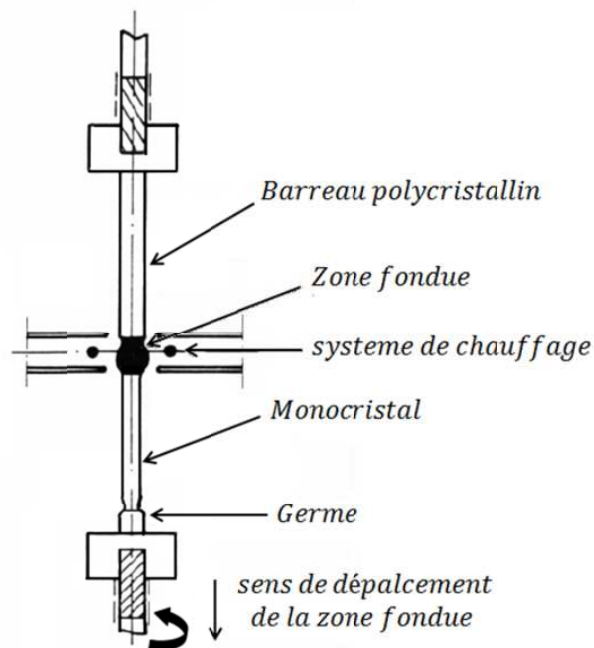


Figure 63 : Principe de la méthode de la zone fondue.

La fusion du matériau peut être réalisée par différentes techniques telles que le chauffage par induction magnétique (RF), le chauffage par concentration d'un rayonnement lumineux (lampes ou LASER), ...etc.

2.4. Dopage des semiconducteurs

L'étape du dopage est une étape importante pour la réalisation des dispositifs à semiconducteurs. Comme nous savons tous, les propriétés électroniques, optiques, et magnétiques d'un semiconducteurs sont très sensibles à la nature et à la concentration des dopants. Par définition, le dopage est l'opération d'introduire des impuretés (atomes étrangères) en petites quantités dans le réseau d'un matériau semiconducteur afin de modifier ses propriétés intrinsèques.

L'introduction des impuretés dans un matériau peut être réalisée par différentes méthodes parmi lesquelles nous pouvons citer :

- Dopage du matériau fondu durant la croissance.
- Dopage par diffusion gazeuse à partir de la surface.
- Dopage par implantation ionique.
- Dopage par réaction nucléaire.

Le choix de la méthode du dopage dépend de la nature de matériau à doper et aussi de la nature du dopant. Jusqu'au début des années 1970, le dopage était principalement fait par diffusion à des températures élevées. Dans cette méthode, les atomes dopants sont placés sur ou à proximité de la surface de Wafer. Depuis le début des années 1970, de nombreuses opérations de dopage ont été effectuées par implantation ionique. Dans ce processus, les ions dopants sont implantés dans le semiconducteur au moyen d'un faisceau d'ions.

Généralement, la diffusion et l'implantation ionique sont utilisées ensembles dans la fabrication des dispositifs et des circuits intégrés car ces processus se complètent. Par exemple, la diffusion est utilisée pour former une jonction profonde (par exemple, un double puits dans le CMOS), tandis que l'implantation d'ions est utilisée pour former une jonction peu profonde (la jonction source-drain du MOSFET par exemple).

2.4.1. Dopage par implantation ionique

La méthode d'implantation ionique consiste à exposer un matériau semiconducteur déjà préparé sous forme d'un wafer ou d'une couche mince à un flux d'ions de hautes énergies. Ces ions arrivent perpendiculairement à la surface avec une énergie suffisamment élevée pour qu'ils pénètrent à l'intérieur du matériau avant d'être freinés sous l'effet des interactions avec les électrons et les atomes du matériau bombardé.

Le principe de fonctionnement d'un implanteur ionique (Fig.64) est le suivant : des atomes sont ionisés dans une chambre d'ionisation, appelée source, dans laquelle un corps contenant l'élément à implanter est amené à l'état plasma. Ces ions sont par la suite extraits vers un aimant

de déflexion qui agit en séparateur de masses et permet d'éliminer les éléments non désirables. Par la suite, les ions sélectionnés seront accélérés par la colonne d'accélération en appliquant une haute tension. Un dispositif de focalisation et de balayage est utilisé pour assurer un balayage homogène de l'échantillon. Le matériau à doper est placé dans une chambre appelée chambre de la cible. La profondeur de pénétration des ions est ajustée par le réglage de la tension d'accélération qui contrôle l'énergie cinétique de ces ions. Généralement, les énergies d'implantation s'étendent de 15 KeV à 200 KeV.

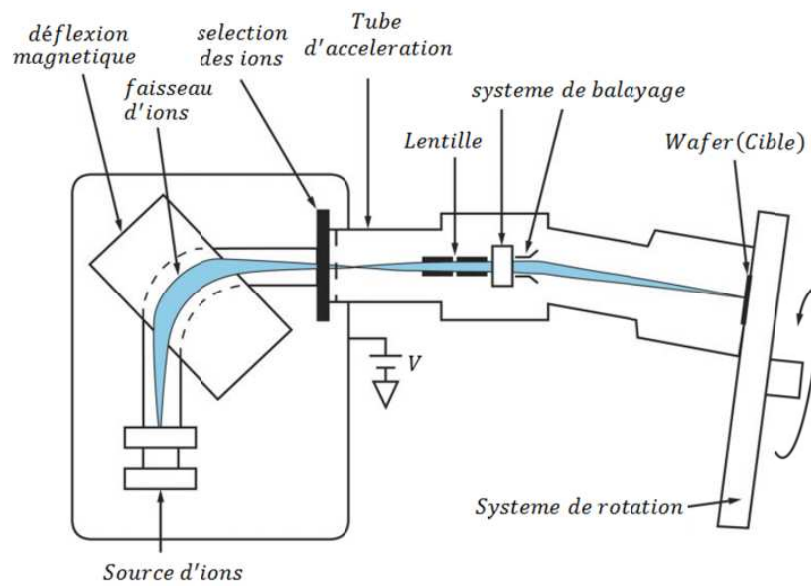


Figure 64 : Schéma d'un implanteur ionique.

Le profil de distribution des atomes implantés est, en première approximation, gaussien et il est donné par la formule suivante :

$$c(x) = c_p e^{\left(-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2} \right)}$$

où R_p est la profondeur moyenne d'implantation. ΔR_p c'est l'écart moyen. c_p est la concentration au pic de la gaussienne ($x = R_p$) et elle est donnée par l'expression

$$c_p = \frac{N_0}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p}$$

avec N_0 est la dose implantée exprimée en atomes/cm².

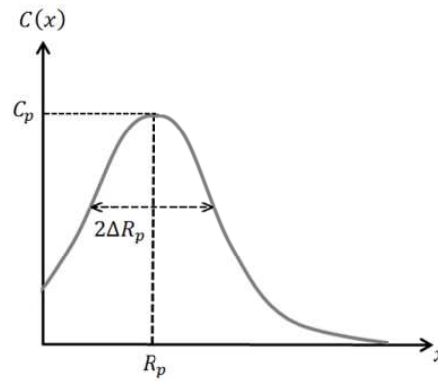


Figure 65 : Profil des dopants par implantation ionique.

Après implantation ionique, l'étape du traitement thermique est nécessaire. Un recuit thermique à une température relativement élevée est nécessaire non seulement pour obtenir une distribution homogène des dopants, mais aussi pour guérir les défauts créés et pour rendre les dopants électriquement actifs.

2.4.2. Dopage par diffusion des dopants

Par définition, la diffusion est le transport de la matière à l'échelle microscopique par migration d'atomes ou molécules de type X d'un milieu riche en X vers un milieu pauvre en X. ce phénomène est l'un des processus fondamentaux dans les matériaux et c'est pour ce raison il a attiré l'attention des spécialistes en sciences des matériaux. Généralement le processus de diffusion se produit à des températures relativement élevées. Dans un tel processus, des atomes étrangers appelés impuretés ou dopants diffusent à travers le réseau cristallin d'un matériau donné en rencontrant des défauts ponctuels (souvent des lacunes). Ce phénomène est bien décrit par les lois de Fick qui nous permet de déterminer le profil de distribution des impuretés à l'intérieur du solide.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

où D est le coefficient de diffusion de l'impureté X dans le matériau.

Le profil du dopage est la solution de cette équation et il dépend des conditions initiales et de la géométrie du problème.

a. Géométrie de la couche mince

Si le diffusant est déposé initialement on surface puis il diffuse à l'intérieur du matériau, le profil du dopant sera dans ce cas (Fig.66.a) :

$$C(x, t) = \frac{M}{\sqrt{\pi D t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 D t}\right)$$

La quantité $L(T, t) = 2\sqrt{Dt}$ est appelée *longueur caractéristique de diffusion*.

b. Concentration constante en surface

C'est le cas du dopage par source gazeuse. La concentration en dopants au niveau de la surface est constante en fonction du temps $C(0, t) = C_s$. Le profil des dopants à l'intérieur du matériau dans ce cas est donné par (Fig.66.b) :

$$C(x, t) = C_s \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

La quantité de masse diffusée par unité de surface et pendant un temps t est donnée par

$$M = 2C_s\sqrt{Dt/\pi}$$

La concentration maximale en dopants que l'on peut introduire dans le matériau est limitée par leurs solubilités dans ce matériau.

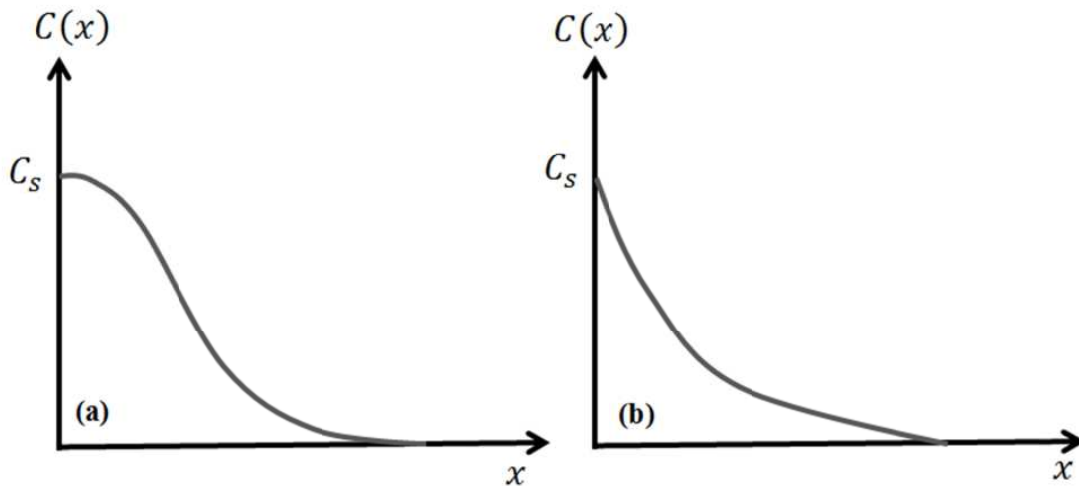


Figure 66 : Profil des dopants lors du dopage par diffusion : a) géométrie de la couche mine et b) concentration des dopants constante en surface.

2.5. Procédés de fabrication des dispositifs à semiconducteurs

Les procédés utilisés pour la fabrication des dispositifs à semiconducteurs englobent tous les opérations nécessaires pour l'élaboration des composants électroniques et optoélectroniques ayant comme base des matériaux semiconducteurs. En fait, la fabrication de ces dispositifs est une opération compliquée qui, selon la nature du dispositif, nécessite quelques étapes à quelques centaines d'étapes.

D'autre part, la fabrication de circuits intégrés à base de semiconducteurs intègre la science des matériaux, la caractérisation des matériaux et l'ingénierie des procédés de semiconducteurs. Un précepte implicite pour la croissance des matériaux et la fabrication de dispositifs est que ces processus doivent être manufacturables : contrôlés, reproductibles et soutenus par des tolérances

de fabrication et de fonctionnement réalistes, en particulier pour les géométries de dimensions critiques fines.

Les principaux problèmes liés à la fabrication d'un dispositif sont : 1) la sélection des matériaux et des critères de conception pour obtenir un ensemble souhaité de caractéristiques et de performances de dispositif, et 2) la définition et le contrôle des étapes de traitement requises.

Une séquence de processus typique impliquera le dopage (par diffusion ou implantation ionique), le dépôt de photorésist, l'isolement, le recuit, la gravure, les métallisations, les dépôts diélectriques, et le test de la plaquette/puce, ainsi que plusieurs passages à travers plusieurs de ces étapes. Toutes les séquences de processus doivent être exécutées avec succès à des rendements élevés pour fabriquer des dispositifs fonctionnels et compétitifs.

2.5.1. L'isolation électrique

L'isolation électrique est nécessaire pour empêcher l'interaction entre les dispositifs d'un circuit intégré. L'objectif est de limiter ou d'éliminer les flux de courant entre les composants et les effets de champ électrique à des niveaux inférieurs à ceux qui affectent le fonctionnement de l'appareil. D'autre part, les parasites et le bruit dans le circuit peuvent être réduits en appliquant correctement des techniques d'isolation afin d'obtenir des performances plus élevées. Les capacités, le couplage inductif et les courants de fuite peuvent être atténués. De plus, les électrons et/ou les trous peuvent être mieux confinés à l'intérieur de la cellule du transistor. L'utilisation de l'isolation conduit à des caractéristiques électriques plus reproductibles, et à un meilleur contrôle de la distribution de charge dans les dispositifs.

Il existe deux approches principales pour isoler les dispositifs dans un circuit intégré à base de semiconducteurs: l'implantation ionique et la gravure « mesa ». Chaque méthode a ses propres avantages et inconvénients. L'isolement par la gravure Mesa a été développé en premier mais au fur et à mesure que la qualité du matériau du substrat et les processus de fabrication des dispositifs se sont améliorés, l'implantation ionique devient la méthode de choix pour l'isolement. En effet, l'implantation permet une morphologie plane souhaitable et la création de dispositifs de géométries plus fines qui sont nécessaires pour fabriquer des circuits à haute densité avec des rendements et une fiabilité élevés. Cependant, l'isolement efficace de couches très peu profondes, ou fortement dopées, s'avère souvent difficile en pratique en raison de la distribution gaussienne du processus d'implantation ionique. L'implantation à travers une résine photosensible ou d'autres couches de recouvrement peut résoudre ce problème en plaçant le pic de la distribution des ions dans la région proche de la surface.

2.5.2. La lithographie

Dans les circuits intégrés, chaque composant électronique (diode, transistor, ..) occupe un endroit ou un espace bien déterminé sur le wafer. Pour fabriquer ces composants, il faut construire des régions possédant des propriétés différentes en termes de dopage (faiblement ou fortement dopées), et de nature (intrinsèques, dopées, isolantes). De plus, il faudra relier entre les différentes zones par des connexions conductrices (métalliques). Donc, chaque opération dans le procédé de fabrication de ces circuits doit être strictement limitée aux régions choisies sur le wafer, chose n'est pas facile et nécessite une technique particulière. Dans ce contexte, la *lithographie* se présente comme solution parfaite pour faire ce choix. En effet, c'est la technique de base pour la fabrication collective des composants.

Littéralement, le mot lithographie veut dire 'écriture sur pierre'. Son origine remonte à une ancienne méthode d'impression en noir et blanc à partir d'une pierre calcaire sur laquelle est reporté un motif (à l'envers) avec une encre, motif qui sera ensuite transféré par contact sur le support à imprimer. On retrouve la plupart de dérivés de cette méthode dans les procédés d'imprimerie.

La version la plus utilisée pour la fabrication des dispositifs à semiconducteurs est la photolithographie. Nous pouvons définir la photolithographie comme étant l'étape qui nous permet une opération technologique (dopage, implantation, gravure, ..) de façon **sélective** à certains endroits du dispositif ou du circuit intégré. Prenons par exemple le cas simple de fabrication d'une zone dopée (n ou p) sur un wafer. Les étapes nécessaires pour ce procédé sont :

- Dépôt d'une résine.
- Insolation de la résine par un rayonnement (UV généralement).
- Développement de la résine.
- Dépôt à travers la résine.
- Enlèvement de la résine.

Donc, comme nous pouvons le constater, la photolithographie nécessite l'utilisation d'une résine (photorésine). En effet, Le principe de la photolithographie repose sur la capacité des résines à voir leur solubilité évoluer selon la quantité de radiation lumineuse absorbée.

La photorésine est une résine organique photosensible. Notons qu'il y a deux types de résines : les résines positives et les résines négatives. La différence majeure entre ces deux types est la suivante : la résine positive subsiste après développement dans les endroits qui n'ont été pas

exposés à la lumière tandis que la photorésine négative subsiste après développement dans les endroits qui ont été exposés à la lumière.

Les photorésines positives sont composées généralement de trois matériaux : une matrice (une résine de base), un composé photosensible et un solvant. Les propriétés de la résine sont altérées par des transformations photochimiques du matériau photoactif, la principale conséquence étant la modification de sa solubilité.

- **La matrice (résine de base)** est une résine polymère, fréquemment désignée par le terme générique 'novolak', qui est un Cresol/Formaldéhyde. C'est elle qui procure au film, une fois polymérisée, ses propriétés mécaniques et physiques. La vitesse de dissolution d'un film seulement composé de novolak (sans agent photoactif) dans un développeur aqueux est de l'ordre de $150 \text{Å} \cdot \text{s}^{-1}$. Les résines Novolak possèdent de bonnes propriétés de stabilité thermique, de résistance aux agents de gravure, et permettent d'atteindre de hautes résolutions de motifs. Elles offrent aussi une bonne transparence et sont solubles dans des développeurs aqueux.
- **Le composé actif (PAC)** dans les résines positives est du diazonaphtoquinone (DNQ). Il doit être insoluble ou peu soluble dans le développeur.
- **Le Solvant** détermine la viscosité de la résine. Il forme à peu près 70 % de la résine et il est constitué généralement de plusieurs composants. Aujourd'hui ce sont essentiellement des PGMEA (Propylene Glycol Monomethyl Éther Acetate) et des Ethyl Lactate (EEP, Ethyl 3-Ethoxy Propionate).

La photorésine positive est insoluble dans la solution de développement avant exposition à la lumière. Cependant, lors de l'exposition, le composant actif absorbe de la lumière, change sa structure chimique, et devient soluble.

La photorésine négative est généralement composée d'un polymère de faible masse atomique et d'un composé actif. Lors de sa exposition à la lumière, le composé actif réagit et catalyse la formation de chaînes polymériques de masses atomiques élevées qui sont à leur tour insolubles dans la solution de développement.

2.5.3. La Gravure

Généralement, les étapes de photolithographie sont suivies soit par l'étape d'implantation ou par l'étape de gravure. La gravure est une étape qui permet d'enlever de la matière dans des zones déjà définies par la photolithographie. Nous distinguons deux types possibles de gravure : la gravure sèche, et la gravure humide.

a. La gravure humide

Dans le cas de la gravure humide, une solution chimique adéquate est utilisée pour attaquer le matériau cible, donc il s'agit d'une attaque chimique. Après photolithographie, le substrat (wafer) est trempé dans un bain contenant une solution chimique qui attaque par exemple le Si mais pas la résine. Une zone gravée se forme dont la profondeur dépend du temps d'immersion. D'autre part, l'expérience a montré que la vitesse de gravure dépend de la concentration de la solution chimique utilisée. Le choix de la solution d'attaque dépend de la nature du matériau cible (semiconducteur, oxyde, ..). Le tableau suivant montre quelques cas.

Matériau à graver	Solution d'attaque
Si (monocristallin ou polycristallin)	HF+HNO ₃ , KOH chaud
SiO ₂	HF
Si ₃ N ₄	H ₃ PO ₄ bouillant
Al	HCl, H ₃ PO ₄ , les acides généralement
Résine	HNO ₃ , H ₂ SO ₄ +H ₂ O ₂

b. La gravure sèche

Dans le cas de la gravure sèche, les choses sont complètement différentes. Il ne s'agit pas ici de contrôler une réaction chimique dans un bain. La gravure sèche consiste à exposer une zone non protégée du wafer ou de dispositif à un bombardement par des ions de hautes énergies. Cette opération nécessite l'utilisation d'une enceinte sous vide et la création d'un plasma. Trois techniques peuvent être utilisées dans la gravure sèche : la gravure par pulvérisation (sputtering), la gravure par plasma, et la gravure ionique réactive (RIE). La production du plasma se fait dans une enceinte fermée qui contient un gaz à basse pression ($< 10^{-2}$ torr). Le plasma est créé par l'application d'une tension continue élevée de plusieurs centaines de volts ou par l'application d'une tension élevée de type RF (radio fréquence).

Dans la gravure sèche, l'extraction de la matière à partir des zones sélectionnées est basée sur deux principes physiques. Le premier principe est l'arrachement des atomes de la surface du matériau cible par collision élastique avec les ions incidents. Le deuxième principe est l'activité chimique en surface du matériau cible (wafer) exposé à un plasma.

La gravure par pulvérisation utilise le premier principe, l'interaction ion incident-matériau cible est purement mécanique. La gravure dans ce cas est essentiellement anisotrope mais de faible sélectivité.

La gravure par plasma utilise le deuxième principe, l'interaction ion incident-matériau cible est purement chimique à cause de la présence d'ions réactifs dans le plasma. La gravure dans ce cas est essentiellement isotrope mais sélective.

La gravure RIE elle aussi utilise le deuxième principe. Dans ce cas, le plasma est généré loin de la surface du matériau cible cependant les radicaux réactifs ont la possibilité de diffuser jusqu'à cette surface.

Matériau à graver	Gaz utilisé dans le plasma
Si (monocristallin ou polycristallin)	CF ₄ (+O ₂), SF ₆ (+O ₂), HBr, CCl ₄ , ..
SiO ₂ et Si ₃ N ₄	CF ₄ (+H ₂), C ₂ F ₆ , ..
Al	CCl ₄
Résine	O ₂

c. La gravure méso

L'isolation Mesa est une méthode efficace pour isoler les dispositifs discrets et les régions actives dans les circuits intégrés. La technique consiste à définir des régions entourant les dispositifs actifs avec une couche de résine photosensible ou d'autres matériaux de masquage, puis à graver le matériau exposé pour former des îlots isolés ou des « mesas » à la surface. La gravure peut être réalisée par des méthodes de chimie « humide » ou « sèche ».

Une exigence clé du processus de définition de mesa est de produire une morphologie compatible avec toutes les étapes de traitement ultérieures.

2.5.4. Insolation

L'insolation consiste à exposer certaines zones de la résine, par le biais d'un dispositif de masquage, à un rayonnement lumineux (généralement l'ultraviolet). Il se crée alors, par réaction photochimique, une image latente dans l'épaisseur de la résine photosensible. Le degré d'exposition dépend essentiellement de l'intensité de la source lumineuse utilisée et du temps d'exposition et il est mesuré par l'intermédiaire d'une énergie surfacique ($J.m^{-2}$). Le degré d'exposition détermine le degré d'avancement de la réaction photochimique qui dépend à son tour de la sensibilité de la résine. D'autre part, l'exposition de la résine est une étape critique du procédé de photolithographie pour plusieurs raisons : a) dans un cycle de production, on procède plaque par plaque, donc la durée d'exposition influe directement sur le temps total de cycle. b) La durée d'exposition est un paramètre offrant assez peu de marges car, sous illumination, une

résine entraîne une dégradation sensible de la résolution des motifs. c) Le temps consacré à l'alignement des plaquettes n'est pas négligeable et il est difficilement réductible.

2.5.5. Métallisation

La métallisation est une étape importante dans le procédé de fabrication des dispositifs à semiconducteurs. Elle a comme objective de connecter les différents composants dans un circuit intégré les uns aux autres. Elle établit l'interconnexion électrique des couches supérieures des circuits intégrés sous la forme d'impressions complexes de pistes en matériaux conducteurs qui acheminent l'électricité au sein des circuits.

Lorsqu'un contact est établi entre deux matériaux différents, un potentiel de contact (barrière) se développe généralement à l'interface entre les matériaux. Les contacts entre les métaux et les semiconducteurs peuvent être soit ohmiques soit redresseurs (contacts Schottky).

Dans un contact ohmique 'idéal', la barrière est 'transparente' au courant et une caractéristique courant-tension linéaire et symétrique avec une résistance négligeable dans les deux sens est observée à travers le contact. Pour que cela se produise, la concentration des dopants en surface du semiconducteur doit être supérieure ou égale à 10^{19}cm^{-3} . Les contacts ohmiques sont caractérisés par une résistance de contact spécifique R_c : (en Ohm-cm^2) qui définit la résistance moyenne à travers l'interface entre les matériaux en contact. Pour des concentrations de dopants N supérieures à 10^{19}cm^{-3} , R_c diminue à peu près comme $1/\sqrt{N}$. Des concentrations de dopant en surface supérieures à 10^{20}cm^{-3} sont nécessaires pour obtenir des contacts submicroniques de résistance suffisamment faible.

Un contact redresseur "idéal" permet le passage du courant avec peu de résistance dans un sens mais présente une barrière dans l'autre sens. Pour qu'un contact redresseur se forme, la concentration superficielle du semiconducteur doit être inférieure à $5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$. Un contact de type barrière Schottky est réalisé par exemple entre du siliciure d'aluminium ou de platine et du silicium de type n ayant une concentration surfacique $N \leq 5 \cdot 10^{17} \text{cm}^{-3}$.

Pour que l'étape de métallisation s'effectuera avec succès, le métal de contact doit présenter une bonne adhérence au semiconducteur, résister aux cycles de température sans défaillance, permet le passage des courants élevés sans modification des propriétés électriques, et ne pas pénétrer profondément dans le semiconducteur, de sorte que la caractéristique courant- tension des jonctions métal/Sc et Sc/Sc ne soient pas affectées par le métal. Pour un contact redresseur, le métal doit également former une barrière stable qui ne change pas avec le temps.

L'un des défis des technologies modernes consiste à établir des contacts ohmiques à faible résistance et fiables avec des régions semiconductrices de tailles inférieures à $0.1 \mu m$ sans dégrader les jonctions contactées. Étant donné que le nombre de ces contacts approche les 100 à 500 millions par puce, la tâche de faire des contacts sans défaut dans les conceptions de produits à haute densité est devenue de plus en plus difficile.

Les techniques les plus utilisées pour déposer des métaux sont l'évaporation, la pulvérisation cathodique et la techniques CVD et leurs variantes.

a. L'évaporation

L'évaporation d'un métal est réalisée en chauffant le métal dans une enceinte sous vide. Un vide de $10^{-6} - 10^{-7}$ torr est nécessaire pour réduire les collisions des atomes du métal évaporés avec les molécules de gaz résiduel sur leur chemin vers les substrats (wafers) qui sont placées à une certaine distance de la source de métal (Fig.67). A de telles pressions, le libre parcours moyen des molécules est supérieur à la distance entre la source et le substrat. Les molécules de gaz résiduel non seulement détournent les évaporateurs de leurs trajectoires rectilignes, mais peuvent également réagir avec le film métallique en croissance et le contamine. Le taux de vaporisation N_s de la source est proportionnel à la pression partielle d'équilibre du métal à la température d'évaporation et il est donnée par

$$N_s = \frac{P_e}{\sqrt{2\pi m k_B T}} \text{ (molecules cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{)}$$

où P_e est la pression partielle d'équilibre du métal (torr), m la masse d'un atome ou d'une molécule, k_B la constante de Boltzmann et T la température de surface du métal (en °K).

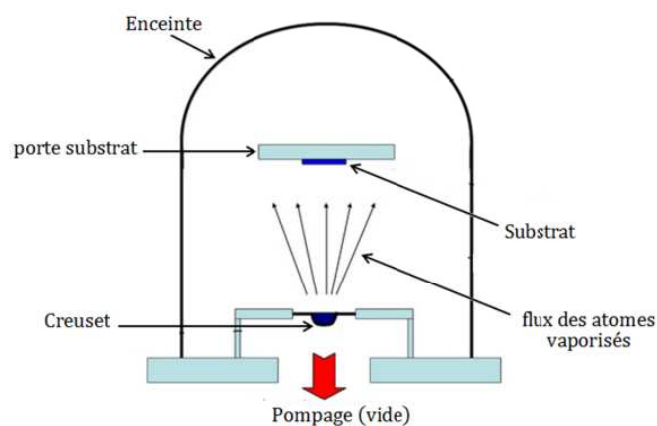


Figure 67 : Système de dépôt par évaporation thermique.

L'évaporation du métal est assurée par l'une des différentes méthodes de chauffage connues comprennent le chauffage résistif, par induction, par faisceau d'électrons et au laser. Le métal est

placé dans un creuset non réactif, typiquement en nitrure de bore ou en métal réfractaire. Dans de nombreuses applications, différents matériaux sont évaporés simultanément pour former un film composite, tel que l'Al-Cu. En raison des différentes pressions de vapeur des composants, des sources séparées sont utilisées et contrôlées individuellement pour donner la composition souhaitée.

b. La pulvérisation

Alors que l'évaporation est largement utilisée pour déposer l'aluminium et ses alliages, la pulvérisation cathodique de ces matériaux est devenue plus pratique en raison de la vitesse de dépôt élevée et de qualité des dépôts (uniformité et homogénéité des couches déposées). De plus, lorsque des métaux réfractaires sont utilisés, une pulvérisation cathodique ou un CVD est nécessaire pour obtenir un taux de fabrication réaliste.

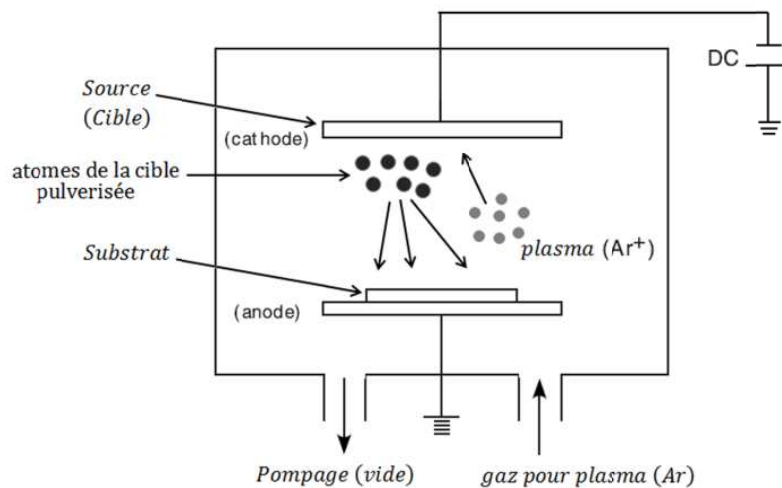


Figure 68 : Dépôt par pulvérisation.

La pulvérisation cathodique implique le transport de matière d'une cible à un substrat. Elle est accomplie par le bombardement de la surface cible avec des ions d'un plasma, typiquement Ar mais parfois d'autres espèces gazeuses inertes (Ne, Kr) ou des espèces réactives telles que l'oxygène ou l'azote (Fig.68). Des particules de dimension atomique de la cible sont éjectées à la suite d'un transfert de quantité de mouvement entre les ions incidents et la cible. Le processus est analogue à l'action d'une boule de billard frappant une autre boule de billard.

Il existe essentiellement deux types de systèmes de pulvérisation cathodique, la pulvérisation cathodique en courant continu et la pulvérisation cathodique RF. La pulvérisation cathodique DC (courant continu) est généralement utilisée pour le dépôt de films métalliques. Il y a deux électrodes dans le système de pulvérisation cathodique. Lorsqu'une polarisation continue négative est appliquée directement sur l'électrode cathodique de la cible métallique, les électrons parasites

accélèrent et gagnent de l'énergie à partir du champ électrique pour bombarder les atomes neutres d'Ar. Si les électrons de bombardement ont une énergie suffisamment plus élevée que l'énergie d'ionisation de l'argon (c'est-à-dire 15,7 eV), Ar sera ionisé et un plasma sera créé. Par la suite, les ions argon positifs dans le plasma sont accélérés vers la cible métallique et pulvérisent les atomes métalliques. Les électrons secondaires émis par la cible métallique pendant la pulvérisation alimentent le plasma.

Pour les applications inclus de semiconducteurs, une pulvérisation magnétron basée sur la variation de la pulvérisation en courant continu a une efficacité plus élevée. La cathode dans la pulvérisation magnétron diffère d'une cathode plane conventionnelle en ce qu'il existe un champ magnétique local parallèle à la surface de la cathode. L'effet du champ magnétique tangentiel peut déplacer les électrons secondaires émis vers la surface de la cathode. Ces électrons sont piégés à proximité de la région cathodique et peuvent conduire à des niveaux très élevés d'ionisation du gaz, ce qui augmente la densité ionique et donc la vitesse de dépôt par pulvérisation.

Bibliographie

- Physique des Semiconducteurs et des Composants électronique, Cours et exercices corrigés, Henry Mathieu, Harvé Fanet, 6^{eme} édition. Dunod, Paris, 2009.
- Semiconductor Devices, Physics and Technology, S.M. Sze, M.K. Lee, 3rd edition. JOHN WILEY & SONS, INC, 2012.
- Compound Semiconductor Devices, Structures and Processing, Kenneth A. Jackson, WILEY-VCH, 1998.
- Physique des Semiconducteurs, Cours et exercices corrigés, Christien Ngô, Hélène Ngô, 4^{eme} édition. Dunod, Paris, 2012.
- Semiconductor Material and Device Characterization, Dieter K. Schroder, 3rd edition. JOHN WILEY & SONS, INC, 2006.
- The Physics of Semiconductors, An Introduction Including Devices and Nanophysics, Marius Grundmann, Springer, 2006.
- Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties, Peter Y. Yu, Manuel Cardona, 4 edition, Springer, 2010.
- Semiconductor Materials: An Introduction to Basic Principles, B.G. Yacobi, Kluwer Academic Publishers, 2004.
- The story of semiconductors, John Orton, Oxford University Press, 2004.
- The material science of semiconductors, Angus Rockett, Springer, 2008.