

INTRODUCTION À LA TECHNOLOGIE

1 - SITUATION DE LA DISCIPLINE : TECHNOLOGIE MICROÉLECTRONIQUE

La technologie microélectronique est une discipline qui se place au centre d'un certain nombre d'activités de la microélectronique en général et du développement de microsystèmes, ces derniers alliant une fonction spécifique (capteur ou actionneur par exemple) à un traitement électronique. 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 fiabilité et la qualité.

En pratique tous ces domaines sont très interdépendants. La figure 1, représentant les différents métiers des semiconducteurs, permet de comprendre les différentes liaisons existant entre les technologues travaillant sur un procédé et leur environnement humain. Cela veut aussi dire que cet environnement doit aussi pouvoir dialoguer avec un technologue. Cela justifie partiellement l'intérêt d'un tel enseignement en formation universitaire ou d'ingénieurs afin de donner à tous les ingénieurs une base de connaissance minimale leur permettant d'établir un dialogue.

Cette discipline va bien sûr nécessiter des connaissances aussi bien en physique des semiconducteurs et en physique des dispositifs, points de départ de la conception et réalisation d'un composant intégré. Mais elle est aussi utilisatrice de connaissances en thermodynamique, statistiques, optique, mécanique, électronique, chimie, etc... qui vont entrer en jeu dans la plupart des étapes technologiques de fabrication. Cette discipline constitue en fait une vraie **science de l'ingénieur**, qui nécessite de nombreuses connaissances scientifiques de base mais aussi de l'ingéniosité. La formidable évolution de la technologie microélectronique durant les 50 dernières années, a été possible grâce à des approches scientifiques très souvent d'une grande simplicité, mais qui dans un ensemble très complexe a permis de faire sauter de façon continue des verrous technologiques

2 - PROCÉDÉS TECHNOLOGIQUES : ÉTAPES ET FILIÈRES

La technologie microélectronique met en œuvre un grand nombre d'étapes élémentaires, près d'un millier dans les circuits les plus complexes en 2006, nécessaires à la fabrication d'un circuit intégré. Les étapes que nous étudions dans ce cours permettent de faire évoluer la matière depuis son état naturel et désordonné (sable) vers une structure de grande complexité et la mieux ordonnée possible pouvant remplir sur le plan électronique une

peut contenir plus de 800 étapes élémentaires qui impose cette démarche. Ceci explique aussi la contrainte pour un industriel de rester dans sa filière, c'est-à-dire de rester le plus possible fidèle à son savoir-faire et sa maîtrise des procédés, et donc de modifier le moins possible les séquences ou les étapes parfaitement mises au point dans ses centrales de fabrication.

Une filière technologique est donc associée à la réalisation d'un type de circuit discret ou 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 et des plaquettes qui subissent un grand nombre d'étapes élémentaires. Ces étapes apparaissent pour certaines plusieurs fois, ce qui signifie qu'il y a un cycle (ou une boucle). En effet, l'opération de photolithogravure qui consiste à transférer un motif inscrit dans un masque sur la plaquette, peut intervenir une bonne vingtaine de fois dans un circuit de haute complexité.

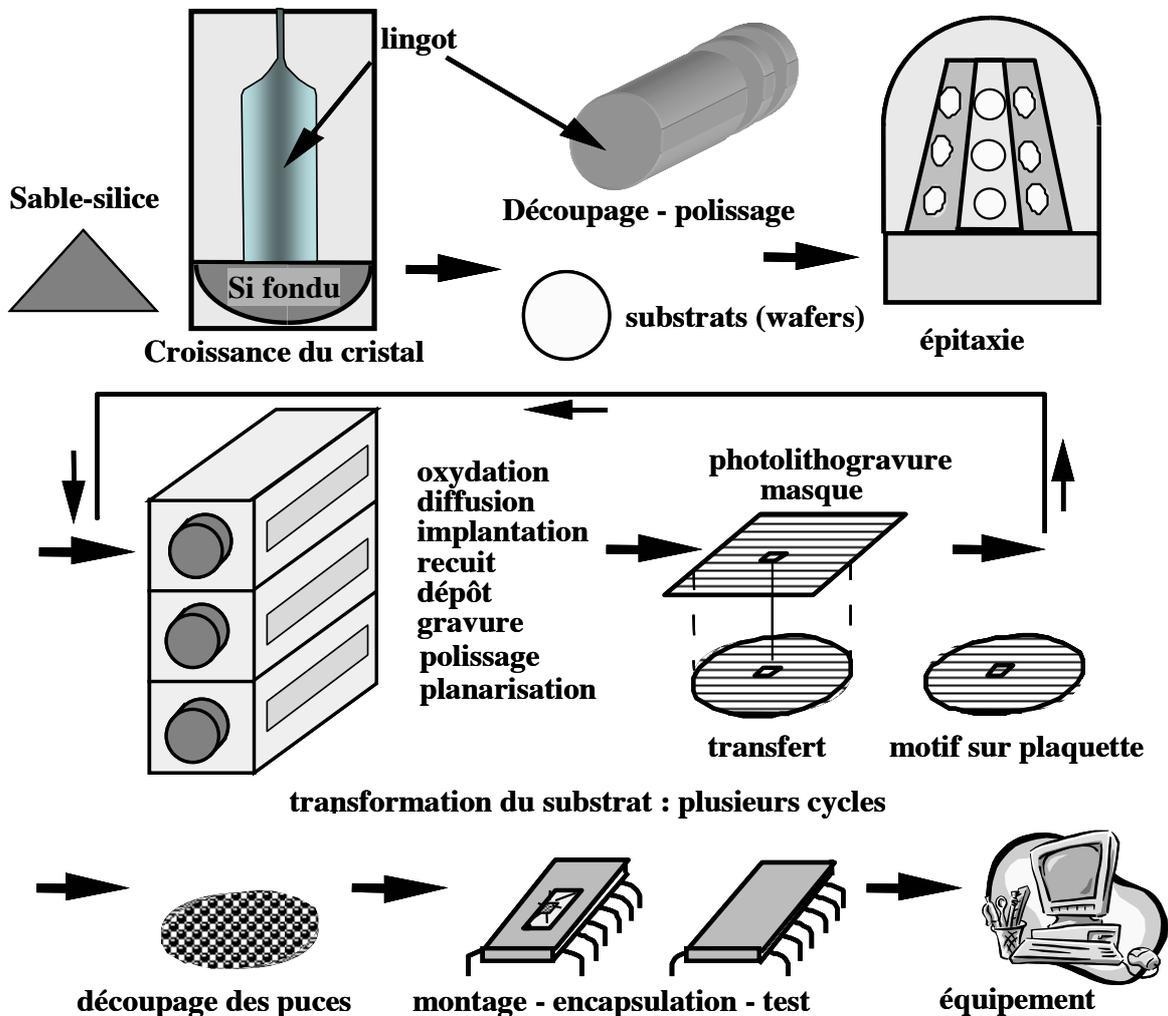


Figure 2 : Cycle simplifié de fabrication d'un circuit intégré.

Quand le cycle, mettant en jeu à plusieurs reprises certaines de ces étapes, est terminé, les plaquettes sont testées puis découpées.

La découpe réalisée suivant des axes cristallographiques permet de réaliser des puces, petits rectangles, de semi-conducteur. Notons que grâce à la maîtrise et la très forte amélioration des rendements de procédés de fabrication, la dimension des puces est passée d'environ 1mm^2 en 1970 à quelques cm^2 en 2000 (*cf. chapitre XIV*).

Les puces sont ensuite insérées dans des boîtiers (boîtier de circuit intégré en plastique moulé par exemple) qui seront eux-mêmes ensuite montés sur des circuits imprimés et connectés grâce aux broches établissant le contact entre la puce et le circuit imprimé.

Dans de nouvelles technologies, les puces sont connectées par la face supérieure à un boîtier comportant des boules d'alliages qui établissent le contact entre les circuits de la puce et le boîtier (technique dite flip-chip).

Dans d'autres cas, plusieurs puces sont montées sur un même substrat, en général en alumine, recouvert de pistes en alliage d'or, monté lui-même dans un boîtier spécial qui permet de limiter le nombre d'interconnexions en utilisant des pistes gravées au niveau du substrat. L'ensemble constitue alors un circuit hybride qui peut contenir plusieurs centaines, voire plusieurs milliers, de broches ou "pattes". Ces circuits sont alors montés sur des circuits imprimés ou directement sur des connecteurs.

OBTENTION DU SILICIUM DE QUALITÉ MIROÉLECTRONIQUE

1 - SOURCES DE SILICIUM

Le silicium existe en grande quantité à la surface du globe terrestre. C'est le deuxième élément de plus fréquent de la croûte terrestre ; O₂ (46%), Si (28%), Al (8%). Sa température de fusion est de 1415°C, qui est donc assez élevée, et son affinité chimique est forte à haute température. Sa température de vaporisation est supérieure à 2500°C. Les sources naturelles sont essentiellement les silicates (sable, etc...) mais aussi zircon, jade, mica, quartz, donc du SiO₂ plus ou moins pur. Le silicium existe donc essentiellement sous forme oxydée et nécessite en conséquence d'une part d'être réduit et d'autre part d'être purifié afin d'obtenir un matériau dit de qualité électronique ou EGS (Electronic Grade Silicon). 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 haute température.

2 - 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 (*c.f. O. Bonnaud, Composants à semiconducteurs, [1]*). La notion de dopage tient compte du fait que l'on peut maîtriser la concentration d'atomes dopants au niveau de 10¹⁴ 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. En effet, dans le cas du silicium, il y a 5.10²² atomes par cm³. Cela signifie que la pureté chimique exigée doit être meilleure que 10⁻⁹, soit d'une partie par milliard (1 ppb ou 0,001 ppm). Cette pureté est extrême et va nécessiter toute une série d'étapes pour y parvenir.

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**).

3 - RÉDUCTION DE LA SILICE

La première étape consiste à effectuer une électrolyse dans un four à arc pour atteindre des températures suffisamment élevées permettant de fondre la silice. La puissance électrique est suffisamment concentrée au niveau de l'arc entre l'électrode en graphite et le bain pour permettre d'atteindre une température supérieure à celle de fusion du silicium et de transformer la silice (SiO₂) initiale en siliciure de carbone grâce à la présence du carbone de l'électrode. Ce siliciure réagit à cette température supérieure à 1750°C avec la silice pour créer du silicium liquide. Le silicium liquide est alors récupéré et refroidi pour obtenir du silicium solide.

En pratique, l'électrode en graphite est consommée par l'arc électrique (figure 3). La réaction bilan est la suivante, sachant qu'en réalité elle résulte de plusieurs réactions chimiques intermédiaires :



Nous donnons dans la suite quelques réactions intermédiaires mises en jeu dans le four à arc montrant la complexité de la chimie effective à ces hautes températures :

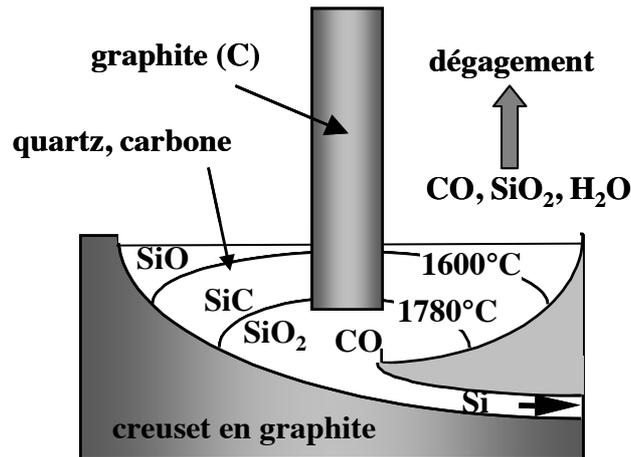
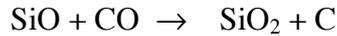
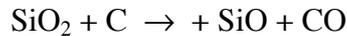
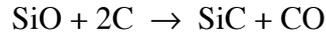


Figure 3 : Électrolyse de la silice permettant d'obtenir du silicium fondu de qualité métallurgique (d'après L. Crossman et al. [2]).

Après cette opération, le silicium obtenu a une pureté voisine de 98 %. Si cette pureté est suffisante pour la métallurgie, il faut l'améliorer de plusieurs ordres de grandeur pour obtenir du matériau adapté à la microélectronique.

4 - PURIFICATION DU SILICIUM MÉTALLURGIQUE

Il s'agit, en partant du silicium métallurgique de purifier chimiquement ce matériau avec un degré de pureté compatible avec les contraintes de la physique du semiconducteur. Une des méthodes utilisées consiste à faire une distillation à partir d'un produit, liquide à température ambiante, composé, *pro-parte*, de silicium. Une possibilité consiste à fabriquer un halogénure de silicium, c'est-à-dire avec un des éléments de la colonne VII du tableau périodique des éléments, qui sont très réactifs.

De nombreux procédés ont été développés par les différents producteurs mondiaux de silicium basés sur le tétrachlorosilane (SiCl₄), c'est le cas de Rhône-Poulenc, Westinghouse, Texas, Saint Gobain, le dichlorosilane (SiH₂Cl₂) mis au point par Wacker, ou le trichlorosilane (SiHCl₃) exploité par Siemens ou Union Carbide. D'autres techniques sont basées sur le tétrafluorosilane (SiF₄), ou le tétraiodure de silicium (SiI₄).

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 :



La réaction avec le chlore permet une première purification puisque par exemple des précipités chlorés de métaux ne sont pas mélangés au trichlorosilane. Une distillation (type alambic) permet alors une purification supérieure.

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

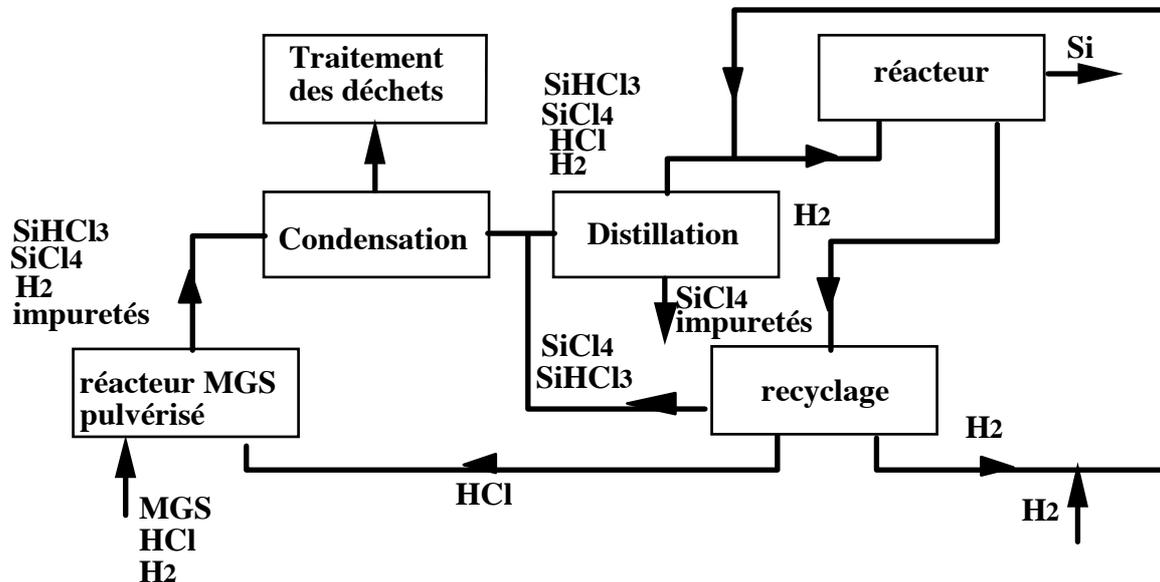
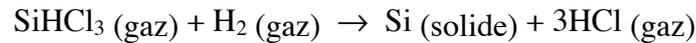


Figure 4 : Distillation du composé de silicium chloré. Après distillation, le réacteur permet d'obtenir le dépôt de silicium.

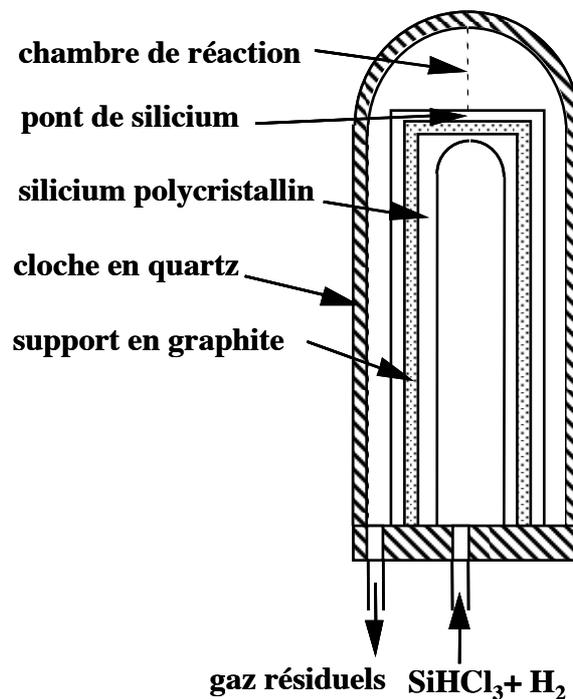


Figure 5 : Schéma d'un réacteur CVD pour la production de silicium de qualité électronique à partir de SiHCl₃ (d'après L. Crossman et J. Baker [2]).

La décomposition dans le réacteur permet de séparer les atomes de silicium qui se trouvent alors en phase gazeuse et qui vont se condenser sur un support. Le support est

dans ce cas en graphite (carbone pur) qui présente l'avantage d'avoir une température de décomposition très élevée. Le procédé est dans ce cas identique à un dépôt chimique en phase vapeur ou CVD qui sera vu au chapitre VIII. Les atomes de silicium qui se condensent n'ont pas assez d'énergie, à la température du procédé, pour constituer des liaisons chimiques avec les atomes situés sur des sites cristallographiques pour fabriquer progressivement un cristal. Toutefois, les atomes parviennent à s'organiser localement, pour constituer des petits cristaux ou cristallites qui sont jointifs mais qui ne sont pas orientés dans les mêmes directions. Dans ces conditions, le matériau est dit polycristallin qui signifie qu'il est constitué de petites cristallites dont les dimensions sont majoritairement inférieures au micron et qui sont juxtaposées. En fait, les atomes constituent des liaisons chimiques aux frontières de cristallites qui ne sont toutefois pas dans les directions de celles d'un cristal parfait.

Dans l'exemple choisi, le silicium polycristallin se dépose sur un suscepteur en graphite. Il faut alors récupérer les « morceaux de silicium » qui seront ensuite traités. Dans certains réacteurs, il est possible de constituer directement un barreau cylindrique de silicium polycristallin. Nous verrons son intérêt plus loin.

Le tableau 1, issu de l'ouvrage de S.M Sze [3], 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. La pureté chimique obtenue est de l'ordre du ppm, soit des concentrations équivalentes de l'ordre de 10^{16} cm^{-3} (c.f. O. Bonnaud, [1]). Ces concentrations sont toutefois de l'ordre de la partie par milliard pour les éléments dopants classiques tels que le bore, le phosphore ou l'antimoine. C'est la condition requise pour espérer contrôler des dopages équivalents de l'ordre de 10^{14} cm^{-3} . C'est à partir de ce silicium polycristallin que l'on doit fabriquer le monocristal.

Tableau 1 : 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[3]).

Impureté ou dopant	MGS (ppm)	EGS (ppm)
Al	1570	-
B	44	<0,001
Fe	2070	4
P	28	<0,002
Sb	-	0,001
Au	-	0,00007

En 2006, la demande annuelle en polysilicium se chiffrait à 13 000 tonnes et on prévoit qu'elle atteindra 150 000 tonnes d'ici 2015. Cette augmentation est prévue pour répondre à une très forte demande dans le domaine du photovoltaïque qui est en fort développement. La production mondiale se concentrait en 2006 au Japon (48%), en Europe (27%) et aux Etats Unis (11%). Des projets d'installation de nouvelles usines, notamment en Europe, sont prévus pour répondre à cet accroissement de la demande.