

III.1 Semiconducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux qui se situent entre les métaux et les isolants en termes de conductivité électrique, une propriété qui leur confère un rôle fondamental dans l'électronique et la science des matériaux. Dans le tableau périodique, ces matériaux appartiennent à la colonne des éléments ayant une valence de quatre, ce qui signifie qu'ils ont quatre électrons de valence dans leur couche électronique externe. Cette configuration permet aux semi-conducteurs d'avoir une conductivité ajustable en fonction des conditions environnementales, telles que la température et la présence d'impuretés. Les semi-conducteurs les plus courants sont le silicium (Si) et le germanium (Ge), le silicium étant particulièrement privilégié en raison de son abondance et de ses propriétés favorables à la fabrication de dispositifs électroniques.

Le silicium, isolé pour la première fois en 1823 par le chimiste Jöns Jacob Berzelius, est le principal constituant du sable. Ce matériau a une densité de $2,33 \text{ g/cm}^3$ et fond à $1410 \text{ }^\circ\text{C}$. Il cristallise dans une structure cubique similaire à celle du diamant, formant un réseau solide où chaque centimètre cube contient environ 5×10^{22} atomes de silicium. Cette structure cristalline permet au silicium d'exhiber des propriétés électroniques particulièrement utiles dans les semi-conducteurs.

III.1.2 Semi-conducteurs purs (ou intrinsèques)

Le silicium pur, ou intrinsèque, est un semi-conducteur avec des propriétés uniques qui le distinguent des conducteurs et des isolants. À zéro absolu (0 K), le silicium pur se comporte comme un isolant, avec sa bande de valence complètement remplie et sa bande de conduction vide, entraînant l'absence de porteurs de charge libres pour soutenir la conductivité électrique. Cependant, à mesure que la température augmente, l'énergie thermique permet à certains électrons d'acquérir une énergie suffisante pour traverser la bande interdite (environ $1,1 \text{ eV}$ à température ambiante) de la bande de valence à la bande de conduction. Cette transition crée des électrons libres dans la bande de conduction et laisse derrière elle des "trous" chargés positivement dans la bande de valence, permettant à la fois aux électrons et aux trous de contribuer à la conductivité électrique.

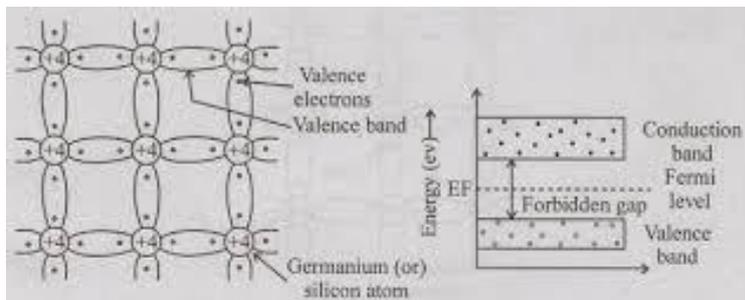


Figure 3.1 Illustration du diagramme de bande.

III.1.2 Silicium dopé

Le dopage est un processus consistant à introduire des atomes d'impureté dans le cristal de silicium afin d'augmenter le nombre de porteurs de charge : électrons libres ou trous. Ce processus permet de créer deux types de semi-conducteurs : le type N (négatif) ou le type P (positif), en fonction des propriétés de l'impureté introduite.

Silicium de type P

Le silicium de type P est un type de semi-conducteur dopé obtenu en introduisant des atomes d'impuretés trivalents, tels que le bore ou l'aluminium, dans le réseau cristallin du silicium. Ces atomes dopants n'ont que trois électrons de valence, un de moins que les quatre du silicium, ce qui entraîne la formation de "trous" — des lacunes où un électron manque — dans la bande de valence du silicium. Ces trous agissent comme des porteurs de charge positive, car ils peuvent attirer des électrons des atomes voisins, créant ainsi un mouvement de charges positives au sein de la structure cristalline. Ce mouvement permet la conductivité électrique, bien qu'avec une efficacité moindre que celle du mouvement des électrons dans le silicium de type N.

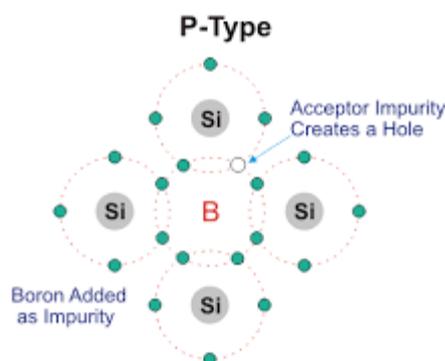


Figure 3.2 Dopage type P de silicium.

Dans le silicium de type P, le niveau de Fermi se rapproche de la bande de valence, ce qui indique une concentration plus élevée de trous par rapport aux électrons. Les trous, qui représentent l'absence d'un électron dans la bande de valence, sont les porteurs de charge majoritaires dans le matériau de type P. Cela fait du silicium de type P un composant essentiel des dispositifs à semi-conducteurs, notamment lorsqu'il est associé au silicium de type N pour créer des jonctions P-N. Ces jonctions forment la base de nombreux dispositifs électroniques, tels que les diodes, les transistors et les cellules photovoltaïques. La capacité de contrôler la distribution des matériaux de type P et de type N est cruciale pour la gestion précise du courant électrique, ce qui est essentiel pour le fonctionnement de l'électronique moderne.

Le silicium de type N est créé en dopant le silicium pur avec des éléments du groupe V du tableau périodique, tels que le phosphore (P), l'arsenic (As) ou l'antimoine (Sb). Ces dopants possèdent cinq électrons de valence, soit un de plus que les quatre du silicium. Ainsi, lorsqu'ils remplacent les atomes de silicium, ils introduisent un électron supplémentaire dans le réseau cristallin. Cet électron supplémentaire devient un porteur libre, ce qui augmente la conductivité électrique du matériau. Dans le silicium de type N, les électrons sont les porteurs de charge

majoritaires, tandis que les trous restent les porteurs minoritaires. Cela confère au silicium de type N une conductivité améliorée par rapport au silicium intrinsèque, ce qui le rend adapté à une large gamme d'applications électroniques, y compris les diodes, les transistors et les cellules photovoltaïques.

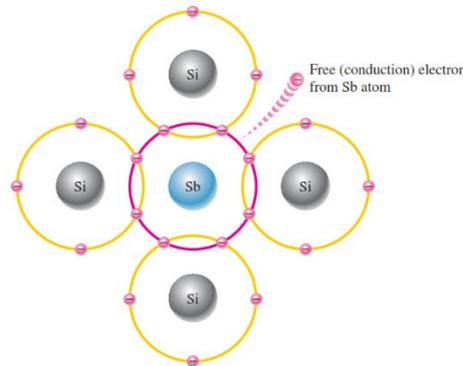


Figure 3.3 dopage type N de silicium

Dans le diagramme de bande du silicium de type N, le niveau de Fermi – le niveau d'énergie où la probabilité de trouver un électron est de 50 % – se déplace plus près de la bande de conduction en raison de l'abondance des électrons fournis par les dopants. Ce déplacement indique qu'une concentration plus élevée d'électrons est disponible pour la conduction par rapport au silicium intrinsèque. La bande de conduction est la plage des niveaux d'énergie où les électrons peuvent se déplacer librement, facilitant ainsi le passage du courant électrique. L'augmentation de la densité d'électrons améliore la capacité du matériau à conduire l'électricité, ce qui fait du silicium de type N un composant fondamental dans l'électronique moderne. L'interaction entre le silicium de type N et le silicium de type P, créant des jonctions PN, est cruciale pour le fonctionnement de divers dispositifs à semi-conducteurs, permettant des fonctions telles que la rectification et l'amplification.

III.2 Notion de dopage

Le dopage est l'introduction intentionnelle d'impuretés dans un matériau semi-conducteur pur afin de modifier ses propriétés électriques. Ce processus est essentiel dans la technologie des semi-conducteurs, car il permet de créer des matériaux ayant des comportements conducteurs spécifiques, adaptés à diverses applications électroniques. Les impuretés, appelées dopants, sont généralement ajoutées en très petites quantités – généralement de l'ordre de la partie par million (ppm) – pour obtenir l'effet souhaité sans altérer de manière significative la structure globale du semi-conducteur.

Il existe deux types principaux de dopage : le dopage de type N et le dopage de type P. Dans le dopage de type N, des éléments du groupe V du tableau périodique, tels que le phosphore, l'arsenic ou l'antimoine, sont ajoutés au silicium. Ces dopants possèdent cinq électrons de valence, ce qui entraîne un excédent d'électrons libres dans le matériau, qui agissent comme des porteurs de charge majoritaires. En revanche, le dopage de type P implique l'ajout d'éléments du groupe III, tels que le bore, l'aluminium ou le gallium, qui n'ont que trois électrons de valence. Cela crée des « trous » ou des déficiences d'électrons, où les porteurs de charge

majoritaires sont les trous, et les électrons deviennent les porteurs minoritaires. La capacité de contrôler le type et la concentration des dopants permet aux ingénieurs de concevoir des semi-conducteurs avec des caractéristiques électriques sur mesure, permettant le développement de divers dispositifs électroniques comme les diodes, les transistors et les circuits intégrés.

III.2.1 Mécanisme de diffusion

Il existe plusieurs mécanismes par lesquels les atomes peuvent diffuser dans un solide, comme une plaque de silicium, lors de la diffusion thermique. Chaque mécanisme varie en fonction du type d'atomes dopants, de la température et des caractéristiques du réseau cristallin. Voici les principaux mécanismes de diffusion dans les solides :

- **Diffusion interstitielle** : Dans ce mécanisme, les atomes se déplacent à travers les espaces entre les atomes du réseau cristallin, appelés sites interstitiels. Ce type de diffusion implique généralement des atomes plus petits (comme l'hydrogène ou le carbone) qui peuvent s'intégrer dans ces espaces sans perturber la structure principale du réseau. La diffusion interstitielle est généralement plus rapide que d'autres mécanismes car elle ne nécessite pas le déplacement des atomes de leurs positions initiales.
- **Diffusion lacunaire** : Ici, les atomes se déplacent en sautant dans des sites vacants du réseau, ou "vacances". Cela nécessite la présence de vacances dans le réseau cristallin, ce qui est plus probable à des températures plus élevées, lorsque les vibrations atomiques provoquent le déplacement de certains atomes de leurs positions d'origine. Les atomes dopants plus gros, comme le bore et le phosphore, diffusent souvent par le mécanisme de la vacance dans le silicium, et ce mécanisme est courant pour les atomes de substitution dans les semi-conducteurs.
- **Diffusion substitutionnelle** : Dans la diffusion substitutionnelle, l'atome dopant remplace un atome de silicium dans le réseau. Ce mécanisme implique souvent la diffusion par vacance, car une vacance permet à l'atome dopant de remplacer un atome de silicium dans la structure du réseau. Cela est typique pour les atomes dopants plus gros, comme l'arsenic, qui nécessitent un site disponible pour s'incorporer dans le réseau de silicium.
- **Diffusion interstitielle**: Ce mécanisme est une combinaison de diffusion interstitielle et substitutionnelle. Un atome dopant entre dans un site interstitiel, pousse un atome du réseau hors de sa position, puis remplace cet atome qui se déplace dans un autre site interstitiel. Ce processus complexe est généralement plus lent et moins courant, mais peut se produire dans certains matériaux sous des conditions spécifiques.
- **Diffusion le long des joints de grains** : Dans les matériaux polycristallins, les atomes peuvent diffuser le long des joints de grains, qui sont des régions entre les cristaux individuels. Ces frontières agissent comme des chemins à haute diffusivité car les atomes y sont moins fortement liés que dans le réseau cristallin, ce qui rend la diffusion beaucoup plus rapide le long de ces frontières. Ce mécanisme n'est pas significatif dans

le silicium monocristallin, mais il est important dans des matériaux comme les métaux et les céramiques.

- **Diffusion de surface** : Les atomes peuvent également diffuser le long de la surface d'un matériau, où les atomes sont moins liés qu'à l'intérieur du matériau. La diffusion de surface est généralement plus rapide que la diffusion dans la masse et devient plus significative dans les films minces ou les nanostructures, où les effets de surface dominant en raison du rapport élevé surface/volume.

Ces mécanismes de diffusion peuvent opérer simultanément, mais leur importance relative dépend de facteurs comme la température, la structure du réseau et les dopants spécifiques utilisés.

III.2.2 Théorie de la diffusion

La théorie de la diffusion décrit comment les particules se propagent des régions de concentration plus élevée vers celles de concentration plus faible au fil du temps, sous l'effet du mouvement thermique. Dans les solides, la diffusion implique le mouvement des atomes ou des molécules à travers un réseau cristallin et est essentielle dans les sciences des matériaux, notamment dans des processus comme le dopage des semi-conducteurs. Le cadre théorique de la diffusion repose sur les lois de Fick, qui décrivent mathématiquement comment la concentration des espèces diffusantes change au fil du temps et de l'espace.

II.2.2.1 Lois de diffusion de Fick

Première loi de Fick

Cette loi s'applique à la diffusion en régime stationnaire, où le gradient de concentration reste constant dans le temps. Elle énonce que le flux de particules, J est proportionnel au gradient de concentration

$$J = -D \frac{dC}{dx} :$$

Où :

- J est le flux de diffusion (quantité de substance par unité de surface et par unité de temps),
- D est le coefficient de diffusion (mesure de la facilité avec laquelle les particules diffusent dans un matériau donné),
- $\frac{dC}{dx}$ est le gradient de concentration.

Le signe négatif indique que la diffusion se produit des zones à haute concentration vers celles à faible concentration.

Deuxième loi de Fick

Cette loi s'applique à la diffusion en régime non stationnaire, où le gradient de concentration évolue dans le temps. Elle décrit comment la concentration C change en fonction de la position x et du temps t :

$$\partial C / \partial t = D \partial^2 C / \partial x^2$$

Cette équation est utilisée pour étudier les profils de diffusion, tels que ceux observés dans le dopage des semi-conducteurs, où la concentration des dopants varie de manière dynamique.

Profil de dopage pour une source limitée

Ce cas s'applique lorsqu'un pic initial de concentration (fonction delta) se diffuse au fil du temps. Par exemple, considérons une situation où une très fine couche d'atomes dopants (concentration initiale M) est introduite en $x = 0$ à $t = 0$. La solution de la deuxième loi de Fick dans ce cas est :

$$C(x, t) = \frac{M}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}$$

Où :

- M est la quantité totale de dopant par unité de surface introduite initialement,
- $\sqrt{4\pi Dt}$ représente l'étalement de la concentration au fil du temps.

Cette solution décrit une distribution gaussienne centrée autour de $x = 0$, avec une largeur de distribution (écart type) augmentant dans le temps $\sigma = \sqrt{2Dt}$. Cet étalement reflète la diffusion des atomes de dopant à partir de l'origine.

Au fur et à mesure que le dopant pénètre dans le semi-conducteur avec le temps, pour maintenir constant le dopant total S , la concentration en surface doit diminuer. En $x=0$, la concentration en surface est donnée par :

$$C(x, t) = \frac{M}{\sqrt{4\pi Dt}}$$

- **Profil de dopage pour une source constante**

Dans ce cas, la concentration en surface d'un dopant est maintenue constante au fil du temps, comme dans un milieu semi-infini avec une concentration constante appliquée à la surface. Supposons qu'à $t = 0$, la concentration de dopant $C(x, 0) = 0$ pour tout $x > 0$ et qu'une concentration en surface constante C_s est appliquée en $x = 0$ pour $t > 0$. La solution à la deuxième loi de Fick dans ce scénario est :

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

Où :

C_s est la concentration constante en surface,

$erfc$ est la fonction complémentaire de l'erreur, qui décrit comment la concentration évolue avec la distance et le temps, $\sqrt{2Dt}$ est la longueur de diffusion.

Dans ce cas, la concentration diminue progressivement avec la profondeur x , depuis la concentration en surface C_s , créant un front de diffusion qui s'enfonce plus profondément dans le matériau au fil du temps. Le profil en fonction de la fonction erreur est commun dans les processus de diffusion, comme le dopage des semi-conducteurs avec une source constante appliquée en surface.

La quantité totale d'atomes dopants par unité de surface dans le semi-conducteur est donnée par:

$$Q(t) = \int_0^{\infty} C(x, t) dx$$

En substituant l'équation du profil $C(x, t)$ dans $Q(t)$, on obtient :

$$Q(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} C_s \sqrt{Dt} \sim 1.13 C_s \sqrt{Dt}$$

3. Coefficient de diffusion et relation d'Arrhenius

Le coefficient de diffusion D dépend de la température et suit la relation d'Arrhenius :

$$D = D_0 e^{-Q/RT}$$

Où :

D_0 est le facteur pré-exponentiel (une constante liée au matériau et à l'espèce en diffusion),

Q est l'énergie d'activation pour la diffusion,

R est la constante des gaz,

T est la température absolue.

Cette équation montre que des températures plus élevées augmentent le coefficient de diffusion, permettant aux particules de se déplacer plus librement dans le réseau cristallin.

En résumé, ces lois permettent de modéliser et de prédire la diffusion des dopants dans les semi-conducteurs, avec des solutions adaptées aux conditions initiales et aux limites du système, comme les profils gaussiens et ceux basés sur la fonction erreur.

III.3 Dopage Thermique du Silicium

Dans le dopage du silicium, deux types principaux de systèmes de diffusion sont utilisés : (i) les systèmes à tube ouvert et (ii) les systèmes à tube fermé. Chaque système de diffusion est

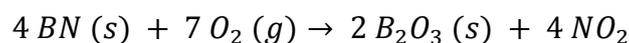
conçu pour garantir des caractéristiques spécifiques essentielles à un dopage efficace et reproductible des plaquettes de silicium, notamment :

- **Contrôle de la Concentration de Surface :** La concentration de surface du dopant doit être ajustable sur une large gamme, atteignant jusqu'à la limite de solubilité solide.
- **Intégrité de Surface :** Le processus de dopage doit préserver l'intégrité de la surface du silicium.
- **Élimination des Dopants Résiduels :** Tout excès de dopant restant après la diffusion doit pouvoir être éliminé sans difficulté.
- **Reproductibilité et Capacité du Système :** Les systèmes de diffusion doivent être capables de traiter plusieurs plaquettes simultanément, maintenant l'uniformité entre les lots.
- **Précision de Température :** Le contrôle de la température dans le four de diffusion doit maintenir une zone stable avec une variation minimale ($\pm 0,5$ °C).

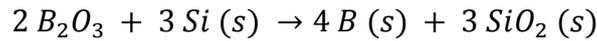
Un four de diffusion est conçu pour atteindre des profils de température uniformes allant de 600 °C à 1200 °C, utilisant généralement un contrôleur à rétroaction pour ajuster le taux de chauffage. Le tube de diffusion, généralement en silice fondue à haute pureté, est soigneusement géré pour éviter toute contamination ; un tube est utilisé par type de dopant. Dans les tubes plus grands, un transporteur est mécaniquement inséré pour déplacer les plaquettes, tandis que le flux de gaz et de dopant est contrôlé depuis l'extrémité opposée. Le four augmente sa température à partir de 600 °C à un taux contrôlé (3-10 °C/min), minimisant ainsi le choc thermique tant pour les plaquettes que pour les composants du tube. En pratique, la température du tube est rarement autorisée à descendre en dessous de 600 °C afin d'éviter la dévitrification de la silice.

III.3.1 Systèmes de Diffusion au Bore pour le Dopage P-Type

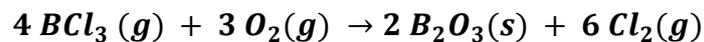
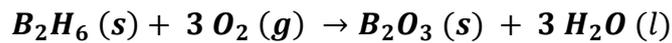
Le bore est le dopant le plus couramment utilisé pour produire du silicium de type P en raison de sa limite élevée de solubilité ($\sim 6 \times 10^{20}$ atomes/cm³). Cependant, le grand facteur d'ajustement du réseau du bore (0,254) peut induire des contraintes et entraîner la formation de défauts, si bien que la limite pratique de concentration est d'environ 5×10^{19} atomes/cm³. Plusieurs sources de diffusion sont disponibles pour le bore, y compris des sources solides, liquides et gazeuses, chacune sélectionnée pour des applications spécifiques et des profils de diffusion contrôlés. **Sources Solides :** Les plaquettes solides en nitrure de bore (BN), légèrement plus grandes que les plaquettes en silicium, peuvent servir comme sources de diffusion au bore. Ces plaquettes BN sont oxydées à 750–1100 °C, formant une couche d'oxyde de bore (B₂O₃) sur la surface, qui sert ensuite comme source dopante. Cette réaction s'exprime comme suit :



Avec un flux minimal de gaz porteur, souvent azote sec, la diffusion inverse des contaminants est empêchée et une excellente uniformité du dopant est obtenue. **Sources Liquides (Systèmes Bubbler) :** La diffusion au bore en phase liquide utilise couramment l'oxyde borique (B₂O₃), qui réagit avec le silicium comme suit :



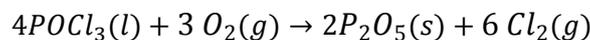
Cette réaction se déroule dans une atmosphère d'azote avec un faible pourcentage d'oxygène pour contrôler les niveaux de B_2O_3 sur la surface des plaquettes. Des sources liquides comme BCl_3 sont introduites par un système bubbler, où un gaz inerte tel que l'argon est utilisé pour vaporiser BCl_3 et le transporter vers la chambre de diffusion, facilitant ainsi un contrôle précis sur la concentration en surface du bore. **Sources Gazeuses :** Le diborane (B_2H_6) et le trichlorure de bore (BCl_3) sont couramment utilisés comme dopants gazeux. La réaction pour la décomposition du B_2H_6 est :



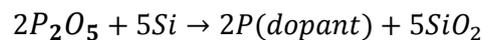
L'utilisation de dopants gazeux permet un contrôle précis des concentrations par ajustement du flux gazeux, ce qui est essentiel pour obtenir une grande uniformité entre les plaquettes.

III.3.2 Systèmes de Diffusion au Phosphore pour le Dopage N-Type

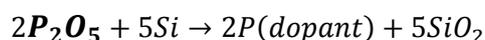
Sources Liquides (Systèmes Bubbler) : La diffusion au phosphore utilise des sources liquides telles que l'oxyde phosphorique ($POCl_3$), qui est largement choisi pour sa capacité à former des régions N-type avec des niveaux élevés de dopage (jusqu'à 5×10^{20} atomes/cm³). Le $POCl_3$ est introduit dans un système de diffusion par un bubbler, où un gaz azoté ou argon transporte le $POCl_3$ vaporisé vers le four, permettant une déposition contrôlée sur la surface des plaquettes. La réaction se déroule comme suit :



Le P_2O_5 réagit ensuite avec le substrat en silicium, déposant des atomes de phosphore tout en produisant un sous-produit d'oxyde silicieux (SiO_2) :



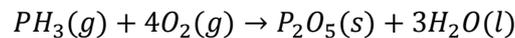
En ajustant la température du bubbler $POCl_3$, il est possible de contrôler finement la concentration en phosphore sur la surface des plaquettes. Des sources gazeuses alternatives au phosphore, telles que le phosphine (PH_3), sont également utilisées, offrant un contrôle élevé via des systèmes à flux gazeux. **Sources Solides :** Une source solide courante pour le dopage au phosphore est l'anhydride phosphorique (P_2O_5). Des plaquettes ou pellets solides en P_2O_5 sont positionnés près des plaquettes en silicium dans le tube de diffusion. À des températures élevées, le P_2O_5 se vaporise et réagit avec le substrat en silicium, déposant ainsi des atomes de phosphore. La haute température du four de diffusion (typiquement entre 900 et 1100 °C) facilite cette réaction :



Cette réaction dépose du phosphore sur la surface du silicium tout en formant simultanément une couche d'oxyde silicieux qui agit comme un revêtement protecteur contre la contamination.

La méthode par source solide fournit une concentration élevée en phosphore, ce qui la rend adaptée aux applications nécessitant des régions N-type fortement dopées.

Sources Gazeuses : Les sources gazeuses pour le dopage au phosphore, telles que le phosphine (PH_3), sont couramment utilisées pour un contrôle précis des concentrations et une facilité d'utilisation dans les systèmes automatisés. Le gaz PH_3 est introduit dans la chambre de diffusion avec un agent oxydant tel que O_2 et subit la réaction suivante :



Le P_2O_5 résultant se forme sur la surface du silicium et diffuse dans la plaquette, créant ainsi des régions N-type. En contrôlant le flux de PH_3 , il est possible d'obtenir des profils de dopage précis et une uniformité entre les plaquettes, ce qui est particulièrement bénéfique dans les applications nécessitant des tolérances strictes. De plus, le PH_3 permet d'atteindre des niveaux inférieurs de dopage en ajustant le flux gazeux, offrant ainsi une flexibilité pour répondre aux spécifications variées des dispositifs. Le tableau ci-dessous fournit une comparaison de l'adéquation de chaque source dans différents contextes de dopage semi-conducteur en fonction des facteurs liés au contrôle, à la sécurité et à la contamination.

Tableau 1 : Résumé des avantages et des inconvénients des sources de dopage

Source de Dopage	Avantages	Inconvénients
Gazeuse	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle précis de la concentration du dopant - Dopage uniforme sur la plaquette - Flexibilité pour des concentrations élevées/basses 	<ul style="list-style-type: none"> - Haute toxicité, risques corrosifs et explosifs - Nécessite un équipement spécialisé coûteux pour une manipulation sécurisée
Liquide	<ul style="list-style-type: none"> - Permet des concentrations de dopage élevées - Livraison efficace par gaz inerte (par exemple, N_2) - Risques de sécurité inférieurs par rapport aux gaz 	<ul style="list-style-type: none"> - Sensible à la géométrie du système (bubblers, contrôle de température) - Peut former des résidus (par exemple, Cl_2), nécessitant un nettoyage
Solide	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en place simple avec des coûts initiaux plus bas - Capable de concentrations élevées sur de longues durées - Manipulation plus facile et plus sûre que les gaz 	<ul style="list-style-type: none"> - Dopage moins uniforme, limitant les applications précises - Risque de contamination plus élevé sur la surface du silicium - L'élimination des résidus peut être difficile

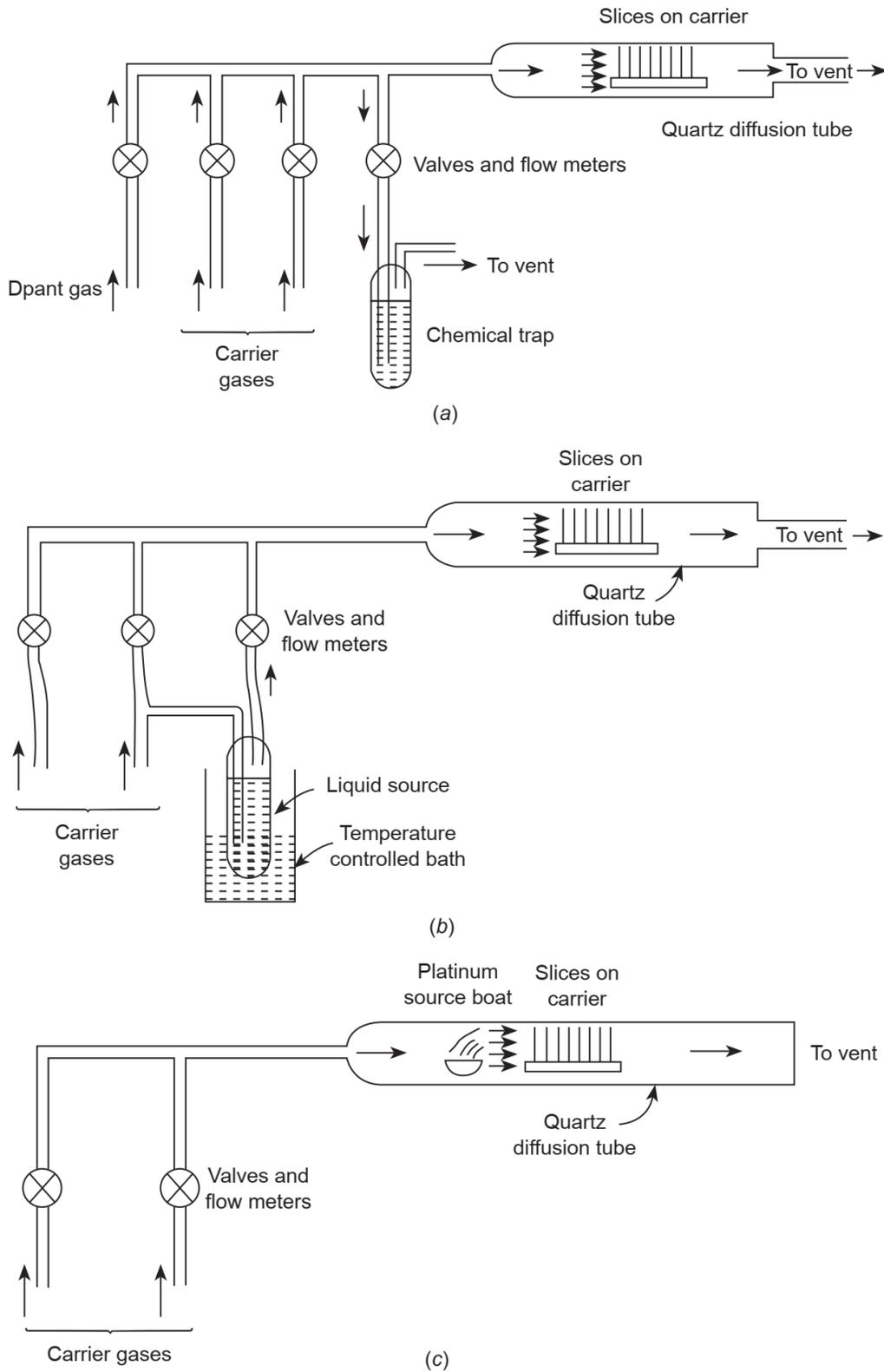


Figure 3.4 Système de diffusion, (a) Source gazeuses (b) Source liquide (c) Source solide.

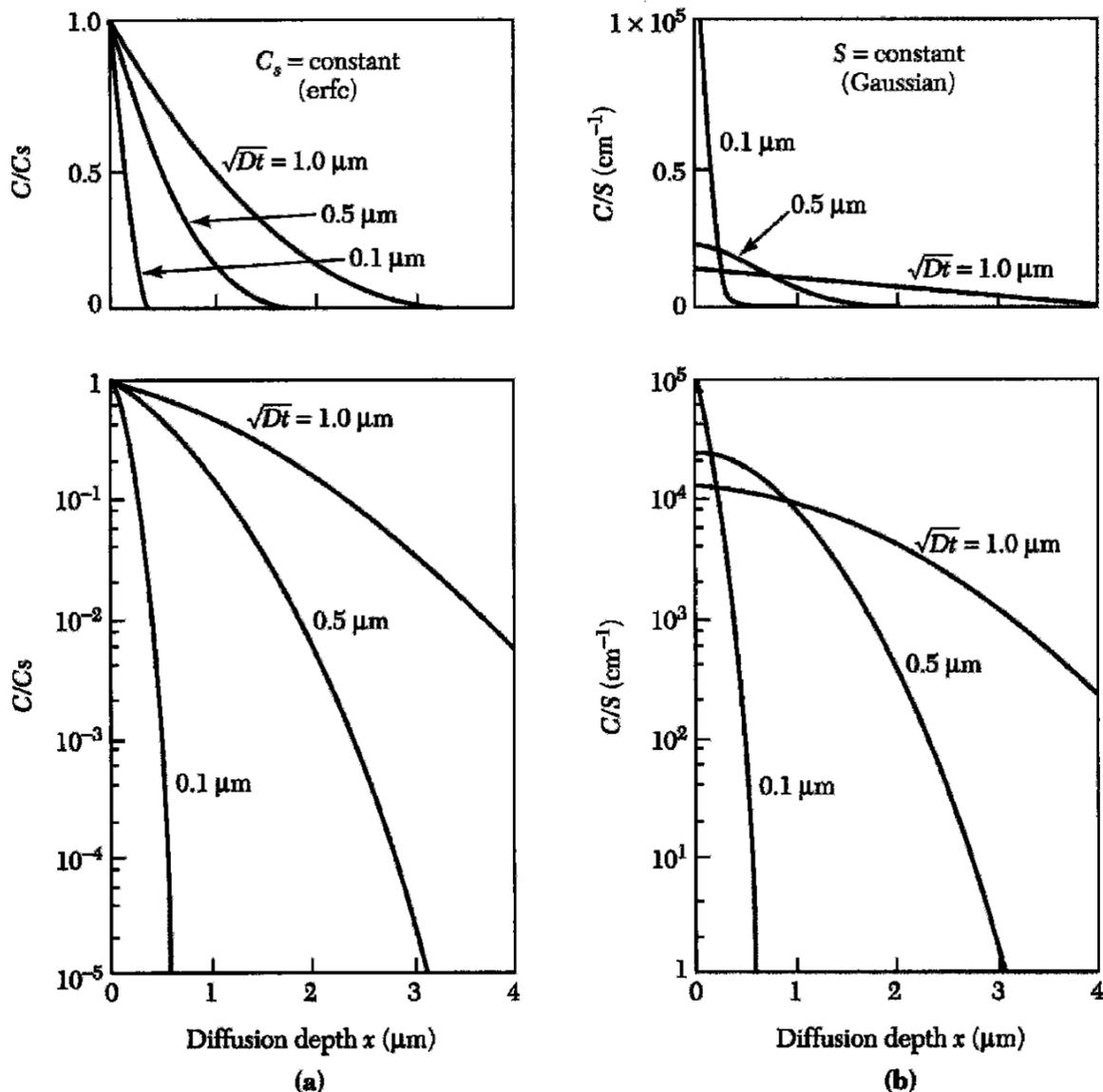


Figure 5. Profils de Diffusion en fonction de la distance pour différentes temps de diffusion : (a) Profil erfc normalisé; (b) Profil Gaussien normalisé.

III.3.3 Dopage par Implantation Ionique : Description de la Méthode

Le dopage par implantation ionique est une technique essentielle dans la fabrication de dispositifs semi-conducteurs, permettant d'introduire des impuretés spécifiques, appelées dopants, dans un matériau semi-conducteur. Cette méthode repose sur le bombardement du semi-conducteur cible par des ions dopants, qui sont préalablement ionisés dans une chambre d'ionisation. Le faisceau ionique généré est ensuite extrait grâce à un champ électrique appliqué à la sortie de cette chambre, puis accéléré avant de passer par un séparateur de masse. Ce dernier utilise un champ magnétique pour sélectionner les ions dopants en fonction de leur rapport masse/charge, éliminant ainsi les éléments indésirables. Les ions sélectionnés sont ensuite

focalisés à l'aide de lentilles quadripolaires et magnétiques, permettant un contrôle précis de leur trajectoire. Un balayage en deux dimensions (x, y)

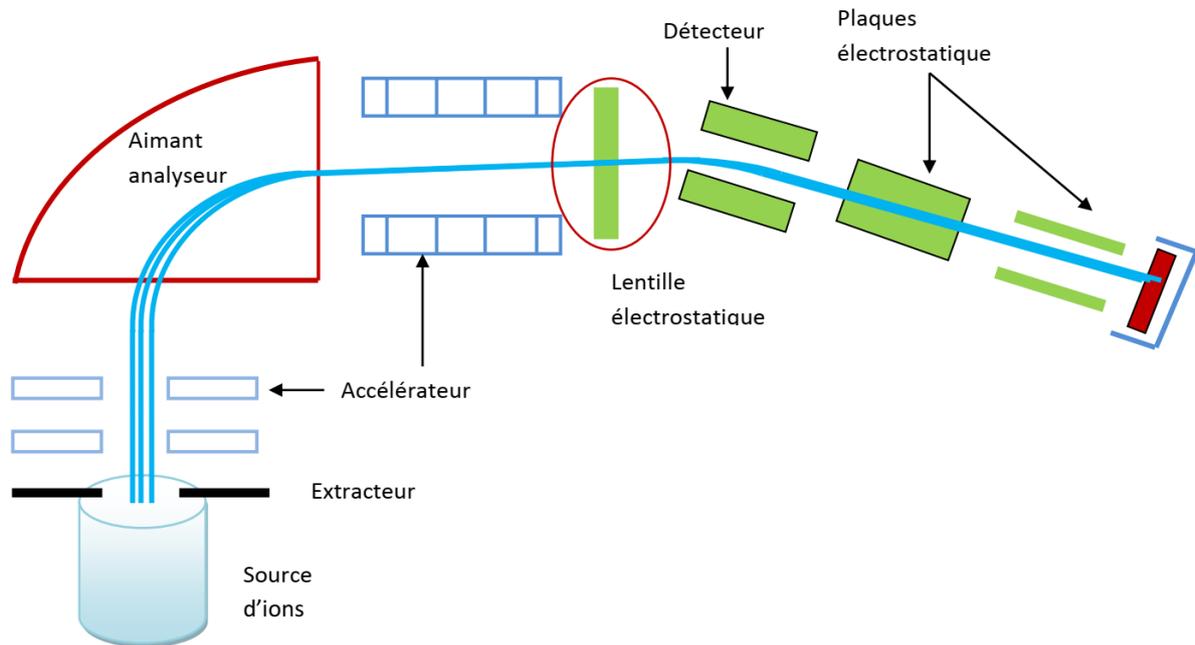


Figure 3.6 Schéma simplifié d'un implantateur ionique.

est effectué pour garantir une implantation homogène sur l'ensemble de l'échantillon. À la fin du processus, un détecteur est placé pour comptabiliser le nombre d'ions implantés, fournissant ainsi des statistiques sur l'efficacité du dopage. Le dispositif d'implantation ionique comprend plusieurs composants clés:

1. Une source d'ions (dopants).
2. Un extracteur d'ions via une électrode.
3. Un aimant magnétique pour la sélection des dopants.
4. Un accélérateur des dopants à l'énergie d'implantation souhaitée.
5. Des lentilles électrostatiques pour la focalisation des dopants.
6. Un système de balayage en x et y pour une implantation uniforme.
7. Un dispositif de déviation du faisceau ionique pour éliminer les ions neutralisés.
8. Un détecteur d'ions pour mesurer la dose des ions implantés.
9. Un système de vide secondaire permettant d'atteindre un vide de 10^{-6} à 10^{-8} torr dans la chambre d'implantation.

III.3.3.1 Principe de l'Implantation

Lorsqu'ils atteignent la surface du matériau, les ions interagissent avec les atomes constituant l'échantillon, leur transférant une partie de leur énergie cinétique. Lorsque cette énergie est suffisante, elle provoque le déplacement d'atomes de leur site cristallin par le biais d'une série de collisions, entraînant ainsi un désordre local dans le réseau cristallin autour de l'ion implanté et créant une zone amorphe dont l'épaisseur peut atteindre quelques dizaines d'Angström (figure 3.6). La profondeur moyenne de pénétration des dopants dans le matériau varie généralement

entre 100 Å et 1 µm, dépendant à la fois de l'énergie des ions incident et de la nature du matériau cible. Des études montrent qu'un ion soumis à une énergie d'implantation de 40 keV dans du silicium cristallin peut déplacer plusieurs millions d'atomes sur son passage, avec un diamètre de zone perturbée compris entre 10 et 100 Å. Cette zone perturbée peut être rétablie après un traitement thermique à des températures comprises entre 900 et 1100 °C, soulignant ainsi l'importance d'un recuit thermique post-implantation pour restaurer la cristallinité du semi-conducteur. Les principaux paramètres influençant l'implantation incluent :

- La dose des dopants implantés,
- Le courant d'implantation,
- Le temps de traitement,
- L'angle de rotation de l'échantillon pour éviter les phénomènes de canalisation.



Figure 3.7 Création d'une zone amorphe à la surface du semi-conducteur par le bombardement ionique.

III.3.3.2 Phénomène de Canalisation du Faisceau Ionique Incident

Dans un matériau cristallin, les atomes sont disposés régulièrement, créant ainsi des "canaux" entre les rangées atomiques. Lors du processus d'implantation, il est possible que les dopants empruntent ces canaux, ce qui leur permet de s'implanter plus profondément tout en interagissant moins avec les atomes du réseau environnant ; ce phénomène est connu sous le nom d'effet de canalisation. Pour minimiser ce phénomène indésirable, il est recommandé d'incliner l'échantillon par rapport au faisceau ionique incident à un angle spécifique par rapport à la normale de sa surface ; dans le cas du silicium, cet angle est généralement fixé à 7°.

III.3.4 Comparaison entre le Dopage par Diffusion Thermique et le Dopage par Implantation Ionique

Une comparaison entre le dopage par diffusion thermique et le dopage par implantation ionique pour le dopage du silicium est présentée dans le tableau 2.

Tableau 2 : Comparaison entre le Dopage par Diffusion Thermique et le Dopage par Implantation Ionique

Aspect	Dopage par Diffusion Thermique	Dopage par Implantation Ionique
Processus	Les dopants sont introduits par diffusion à haute température à partir d'une source de dopant sous forme de gaz, liquide ou solide.	Les ions dopants sont accélérés dans un champ électrique et implantés directement dans le réseau de silicium.
Profil de Dopage	Concentration de dopant progressive avec un gradient de concentration décroissant à mesure que la profondeur augmente (profil gaussien ou fonction d'erreur).	Profil de concentration nettement défini et personnalisable, souvent en forme de boîte ou sur mesure.
Contrôle de la Profondeur	Moins précis, entraîne généralement des profils de diffusion plus profonds et dépendant de la température.	Contrôle très précis sur la profondeur de jonction ; ajustable en modifiant l'énergie des ions.
Uniformité du Dopage	Dépend de l'uniformité de la source de dopant et des conditions de diffusion ; généralement moins précis.	Uniformité et précision très élevées grâce aux paramètres d'implantation contrôlés.
Exigences Équipement	Utilise un four à haute température ; équipement plus simple et moins coûteux.	Nécessite un équipement spécialisé pour l'implantation ionique, qui est plus coûteux et complexe.
Dommages à la Surface	Dommages minimaux car les atomes diffusent naturellement dans le réseau à haute température.	Peut provoquer des dommages au réseau en raison des ions à haute énergie ; nécessite un recuit post-implantation pour réparer les dommages.
Exigences en Recuit	Le recuit est inhérent au processus de diffusion à haute température.	Le recuit est nécessaire pour réparer les dommages d'implantation et activer les dopants.
Sensibilité à la Température	Des températures élevées (généralement 800–1200 °C) sont essentielles pour une diffusion efficace.	Peut être effectué à des températures initialement plus basses, mais un recuit est nécessaire par la suite.
Contrôle sur la Concentration du Dopant	Contrôle modéré ; dépend des réglages du temps et de la température.	Excellent contrôle, permettant un ajustement précis de la concentration du dopant.
Applications Typiques	Largement utilisé dans les processus de dopage basiques, les cellules solaires, les jonctions peu profondes et les dispositifs microélectroniques simples.	Préférentiel pour la fabrication avancée de circuits intégrés, les jonctions peu profondes et précises, ainsi que pour les dispositifs semi-conducteurs complexes.
Coût	Coût généralement inférieur ; idéal pour des applications de dopage moins précises.	Coût plus élevé en raison d'un équipement sophistiqué et d'un contrôle précis.

En résumé, le dopage par diffusion thermique est plus simple et économique, adapté aux applications où des profils de dopage profonds et progressifs sont acceptables, tels que les cellules solaires ou certains processus de semi-conducteurs de base. En revanche, l'implantation ionique offre une plus grande

précision et un meilleur contrôle, ce qui la rend idéale pour les microélectroniques avancées nécessitant des profils de dopage peu profonds et nets ainsi qu'une distribution de dopants très uniforme.