

## 7.1 I semiconduttori

I semiconduttori sono materiali che hanno una resistività intermedia tra i conduttori e gli isolanti. ( $10^{-3} \div 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ )

Un semiconduttore è un materiale isolante a temperature molto basse, ma che ha una apprezzabile conducibilità elettrica a temperatura ambiente (infatti nei semiconduttori all'aumentare della temperatura aumenta la conduttività e diminuisce la resistività al contrario di qualsiasi comune conduttore). La distinzione tra un semiconduttore e un isolante non è molto ben definita; si può dire che un semiconduttore è un isolante con una banda proibita piccola a sufficienza perché la sua banda di conduzione sia apprezzabilmente popolata a temperatura ambiente. Le proprietà dei semiconduttori diventano interessanti se vengono opportunamente drogati con impurità. Una ulteriore proprietà dei semiconduttori è la fotoconduttività, ossia la capacità di diventare buoni conduttori di elettricità se sottoposti a illuminazione con radiazione elettromagnetica opportuna.

## 7.2 Il silicio

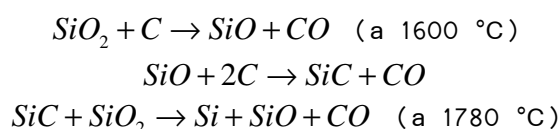
Il silicio è un elemento del IV gruppo del sistema periodico (numero atomico 14). Ha 4 elettroni di valenza che formano legami covalenti con gli atomi adiacenti. È il secondo elemento per abbondanza nella crosta terrestre dopo l'ossigeno, componendone il 25,7% del peso. Non è presente in natura in forma pura, ma come biossido di silicio, silicati e alluminosilicati. Ha un colore grigio scuro, con riflessi blu, ha elevata durezza e fragilità, peso specifico di 2,42 e temperatura di fusione di 1412 °C.

## 7.3 Produzione del silicio

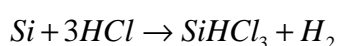
Il silicio utilizzato nei dispositivi elettronici deve avere una grande purezza chimica e una struttura monocristallina perfetta. La purezza si ottiene con vari processi (pirolisi, purificazione chimica, purificazione fisica). La struttura monocristallina si ottiene invece con un processo detto di Czochralsky (dal nome del suo inventore).

### 7.3.1 Silicio di grado metallurgico

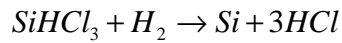
Il silicio di grado metallurgico viene prodotto partendo dalla quarzite, e raggiunge una purezza non superiore al 98%. La tecnica sviluppata per trasformare il  $\text{SiO}_2$  in Si è la carboriduzione: nei forni ad arco sommerso, a temperature superiori a quelle di fusione del silicio (1550°C), vengono prodotte le reazioni:



La sabbia e i cristalli di quarzite vengono sistemati in un crogiolo di grafite; il crogiolo viene inserito in una camera (la "carcassa" del forno), e al suo interno vengono immersi due elettrodi di grafite; durante il funzionamento si crea un arco elettrico sommerso, e il Si liquido che si forma cola, attraverso un opportuno becco, in una lingottiera dove poi solidifica in silicio metallurgico. Questo presenta ancora una percentuale di impurità eccessive per cui tramite gassificazione e due reazioni chimiche avviene il processo Siemens. I blocchi di silicio metallurgico vengono polverizzati e inseriti in un reattore a letto fluido. Nel reattore viene immesso HCl in forma gassosa. Avviene così la reazione:



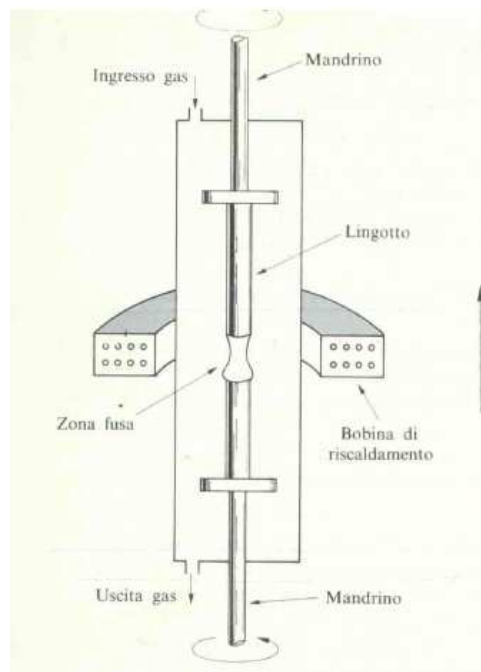
nella quale vengono prodotti idrogeno e triclorosilano. Il triclorosilano (aeriforme) fluisce in un filtro e poi nel reattore CVD (Chemical Vapor Deposition). Qui, tramite l'immissione di idrogeno nel reattore, avviene la deposizione catalitica del silicio, secondo la reazione:



in entrambi i reattori la temperatura raggiunge i 1375°K. A seguito della dissociazione del triclorosilano si forma nuovamente silicio.

### 7.3.2 Purificazione fisica

Un ulteriore operazione è la purificazione fisica del silicio per eliminare ulteriori impurità mediante il metodo di raffinazione a zone. Questo metodo si basa sul fenomeno secondo il quale le impurità contenute nel silicio tendono a fondere più facilmente del silicio. L'apparecchiatura per tale processo è rappresentata in figura seguente:

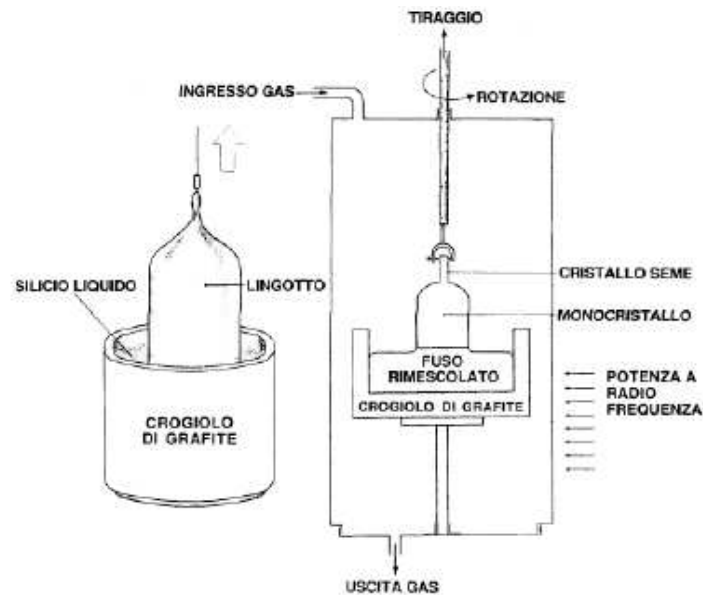


Il lingotto di silicio viene agganciato verticalmente mediante un mandrino in un forno a radiofrequenze, in cui si ottiene il riscaldamento del silicio mediante onde elettromagnetiche emesse da una bobina che circonda il forno. Tali onde creano correnti parassite all'interno del lingotto di silicio, che riscaldano il silicio per effetto Joule. Il silicio liquido scorre lungo la superficie del lingotto e si accumula verso il basso. Il silicio ha una elevata tensione superficiale per cui il silicio liquido rimane collegato al lingotto. Con successivo raffreddamento abbiamo l'effetto complessivo di un allungamento del lingotto in cui le impurità si sono accumulate all'estremità della barretta. Il lingotto viene poi segato per eliminare questa estremità. Il procedimento viene ripetuto per tre, quattro volte.

### 7.3.3 Formazione dei monocristalli

A causa dello stress provocato al lingotto da tutti i trattamenti descritti, esso presenta una struttura policristallina, cioè risulta suddiviso in una pluralità di zone, ciascuna delle quali presenta una propria organizzazione cristallina. L'irregolarità di questa struttura rende elevata la resistività del materiale. Per ridurre la resistività della barretta di silicio occorre dunque fare in modo che essa abbia una struttura

ordinata formata da un solo cristallo (struttura monocristallina). Il metodo utilizzato per ottenere il monocristallo è detto metodo Czochralsky e utilizza la struttura seguente:



Esso si basa sul principio che se si fa solidificare lentamente un materiale cristallino intorno ad un seme di cristallo regolare dello stesso materiale, il materiale tende a solidificare assumendo la struttura del seme. Nel metodo Czochralsky il seme è collegato ad un mandrino in un forno a radiofrequenza e posto a contatto con il silicio liquido presente in un crogiolo di grafite. Il seme viene fatto sollevare molto lentamente e il silicio liquido si solidifica intorno ad esso formando alla fine un lingotto monocristallino. Al termine del processo di Czochralsky, il silicio diventa di grado elettronico. Terminato l'accrescimento del cilindro, questo viene tagliato in fettine sottili alcuni micrometri (wafer). Ogni wafer viene ulteriormente sottoposto a trattamenti di riduzione delle impurezze superficiali ed eliminazione delle imperfezioni fisiche derivanti dalle operazioni di taglio (tecniche di lappatura e lucidatura).

#### 7.3.4 Considerazioni sul metodo Czochralsky

Un fattore cui prestare molta attenzione, nell'esecuzione del metodo Czochralsky, è la velocità di tiraggio del seme ( $v_p$ ). Il cristallo va tirato con una velocità sufficientemente alta, ma non superiore al limite imposto dalla formula:

$$v_p = \frac{k_s}{L\rho_s} \cdot \frac{dT}{dx}$$

Altrimenti gli atomi non diffondono in modo corretto, portando alla formazione di difetti nella struttura che si sta accrescendo. I principali difetti che possono comparire sono le vacanze, le quali si distribuiscono nel cilindro, in forma circolare o di vortice ( $v_p$  non deve essere superiore a 2 mm/min).

La bassa velocità di tiraggio, però, crea problemi riguardo alla dissipazione di calore, il quale va smaltito il più velocemente possibile, e per farlo si ricorre all'aumento delle dimensioni del cilindro.

#### 7.4 Produzione di silicio drogato

La più diffusa tecnologia per realizzare circuiti integrati, utilizza come materiale di partenza (substrato), il silicio di tipo p o di tipo n. Il silicio di tipo p, ad esempio, ha una resistività dell'ordine di  $1 \div 50 \Omega \cdot \text{cm}$ . Ciò corrisponde ad una concentrazione di  $10^{13} \div 10^{16}$  accettori, ossia un atomo di impurezza

ogni  $10^7 \div 10^6$  atomi di Si. Il silicio fuso, quindi, viene arricchito con sostanze droganti, come ad esempio Boro trivalente, prima dell'accrescimento del cilindro. Analogamente, per creare silicio di tipo n, si utilizzano sostanze droganti come Fosforo o Antimonio.

### 7.5 Purificazione del silicio drogato

Terminata la creazione dei wafer di silicio drogato, si eseguono dei controlli mirati a determinare la corretta distribuzione del drogante all'interno della struttura e l'assenza di difetti. I difetti eventualmente presenti vengono eliminati con la tecnica detta di gettering.

Più specificamente, lo scopo è ridurre la concentrazione di impurità indesiderate nella regione superficiale della fetta di silicio, che è quella elettricamente attiva. In questo modo viene formata in superficie una zona ("denuded zone", che ha spessore tipico di  $10 \div 20 \mu\text{m}$ ) pressoché immune dalle impurità. Per raggiungere tale scopo, tipicamente le impurità indesiderate vengono fatte precipitare in zone della fetta elettricamente non attive, o vengono fatte uscire dalla fetta stessa verso l'ambiente circostante, o vengono fatte combinare con altri elementi per formare composti non dannosi. Tecniche molto comuni di gettering prevedono il danneggiamento del retro della fetta: questo danneggiamento provoca nella struttura cristallina difetti che fungono da trappole per le impurità indesiderate (la migrazione delle impurità verso queste trappole viene favorita mediante un opportuno trattamento termico). Un'altra tecnica di gettering prevede la combinazione dell'ossigeno presente all'interno delle fette (soprattutto se ottenute con tecnica Czochralski) con le impurità indesiderate, al fine di formare precipitati e/o cluster di  $\text{SiO}_2$  che agiscono come trappole per le impurità stesse ("gettering intrinseco", perché sfrutta elementi già presenti nella fetta).