

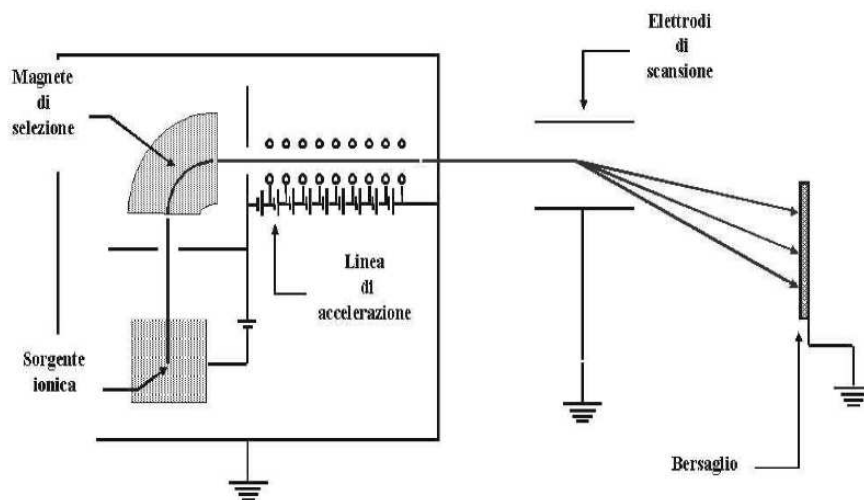
## 10 Impiantazione ionica

L'impiantazione ionica è una tecnica mediante la quale un substrato di silicio viene drogato con ioni, al fine di variarne la resistività. I vantaggi di tale tecnica sono rappresentati dalla possibilità di realizzare profili di concentrazione molto precisi, controllando il numero di ioni impiantati e la loro profondità di penetrazione. Inoltre è un processo che avviene a temperature più basse rispetto alle altre tecniche di drogaggio e non produce reazioni chimiche potenzialmente inquinanti.

Togliendo un elettrone da un atomo le caratteristiche positive non vengono più bilanciate da quelle negative, l'atomo non è più neutro dal punto di vista elettrico e si produce così uno ione positivo di carica  $Q_e = 1,6021 \cdot 10^{-19}$  Coulomb. Questa particella carica se posta in un campo elettrico di potenziale  $V$  viene accelerata fino ad acquistare una Energia cinetica pari a:

$$E_c = qV$$

dove:  $E_c$  è l'energia cinetica acquistata dallo ione (misurata in eV),  $q$  è la carica dello ione e  $V$  è la tensione applicata. La velocità così acquistata dalla particella le permetterà di penetrare più o meno in profondità nel cristallo di silicio. Aumentando il potenziale del campo elettrico l'accelerazione fornita alle particelle sarà maggiore, aumentando così la velocità che acquisteranno nel loro tragitto all'interno dell'impiantatore ionico. Il risultato che così otteniamo è una maggiore penetrazione della particella nel cristallo (a parità di specie atomica e tipo di substrato). Aumentando invece la corrente del fascio di ioni, non varierà la profondità di penetrazione, ma la concentrazione di ioni impiantati. Qui sotto è riportato lo schema di un impiantatore ionico:



### 10.1 Sorgente ionica

È una camera in cui vengono ionizzati materiali, che possono presentarsi in forma solida o gassosa. Tale processo avviene mediante evaporazione o sublimazione del materiale ed il suo successivo bombardamento con elettroni appositamente accelerati oppure con l'uso di un processo di sputtering (generazione di ioni bombardando con altri ioni) alimentato da un opportuno plasma. La quantità di ioni prodotti all'interno della sorgente va a determinare la corrente ionica presente sul bersaglio durante l'impiantazione.

### 10.2 Energia di impianto

Il fascio ionico all'uscita della Sorgente ha un'energia troppo bassa per poter essere utilizzato nell'impiantazione. Esso viene quindi accelerato da un sistema di elettrodi. L'energia di impianto

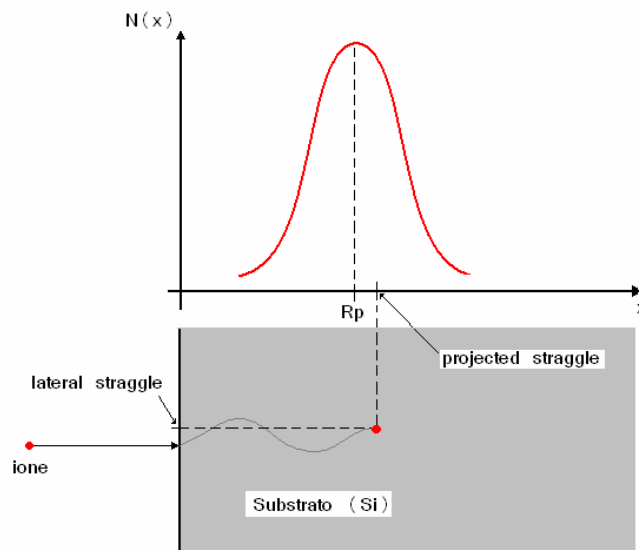
determina la profondità dello strato impiantato nel silicio. Ovviamente non tutti gli ioni impiantati si posizionano alla stessa profondità nel silicio, ma si distribuiscono all'interno del wafer con una forma che è approssimabile ad una curva gaussiana di equazione:

$$N(x) = \frac{s}{\sqrt{2\pi}\Delta R} \cdot \exp\left(-\frac{(x-R)^2}{2\Delta R^2}\right)$$

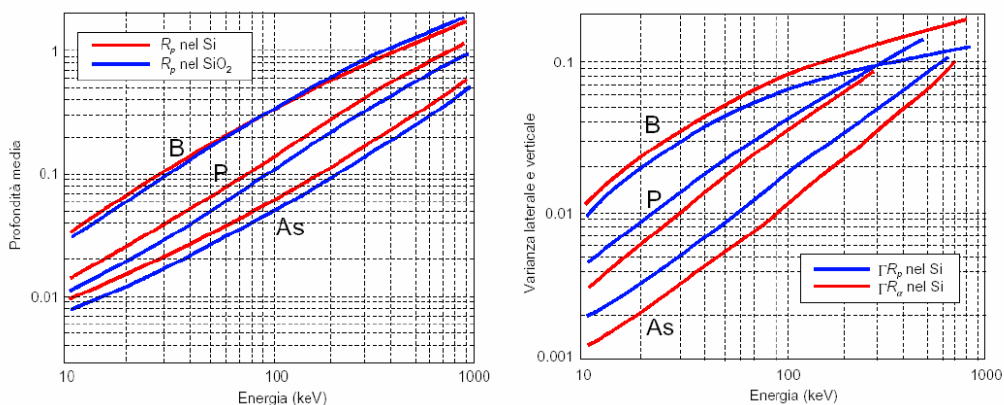
Una curva gaussiana è caratterizzata da due valori particolari, nel nostro caso:

- ♦  $R_p$  (Projected Range) indica la profondità in cui si ha il picco di concentrazione del drogante.  $R_p$ , dunque, definisce la penetrazione media. Una percentuale di ioni via via decrescente penetrerà nel silicio ad una profondità maggiore o minore di quella media. Il valore Delta  $R_p$  è un indice della dispersione degli ioni attorno al punto di massima concentrazione.
- ♦  $\Delta R_p$  definisce la deviazione standard della gaussiana.

$\Delta R_p$  ed  $R_p$  dipendono dallo ione e dall'energia. Energie maggiori permettono, a parità di ione, una penetrazione media maggiore. Ioni più leggeri penetrano più in profondità (a parità di energia di impianto).



Nei grafici seguenti sono rappresentati gli andamenti di profondità media (grafico di sinistra) e varianza (grafico di destra) per boro, fosforo e arsenico, in un substrato di silicio (curva rossa) e in uno strato di ossido di silicio (curva blu):



### 10.3 Meccanismi di arresto degli ioni

I meccanismi di arresto del moto degli ioni sono due:

- ◆ Collisione con nuclei di atomi di silicio (o, in generale, del substrato). Provoca la deflessione dello ione incidente e, spesso la dislocazione dell'atomo del substrato dal suo sito cristallino originale. Questo tipo di collisione ha un potere di arresto pari a:

$$S_n = \left( \frac{dE}{dx} \right)_n$$

- ◆ Collisione con la nube di elettroni che circonda l'atomo del substrato. Provoca il trasferimento degli elettroni colpiti, in un livello di energia più alta, oppure il loro distacco (ionizzazione dell'atomo del substrato). In questo caso il potere di arresto vale:

$$S_e = \left( \frac{dE}{dx} \right)_e$$

Esiste un livello critico di energia di impiantazione, al disotto del quale prevale il "freno" nucleare, e al di sopra prevale il "freno" elettronico. L'energia dello ione diminuisce progressivamente con l'aumentare della profondità, secondo un andamento dato dalla sovrapposizione dei due meccanismi di arresto:

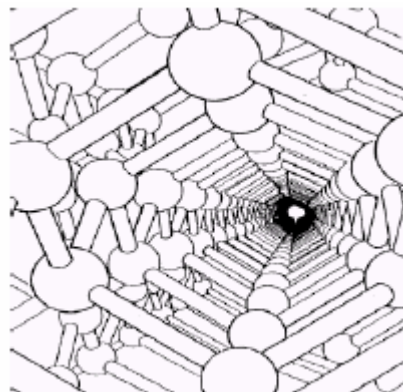
$$\frac{dE}{dx} = S_n(E) + S_e(E)$$

La distanza totale percorsa dagli ioni nel solido, prima di perdere completamente la loro energia è:

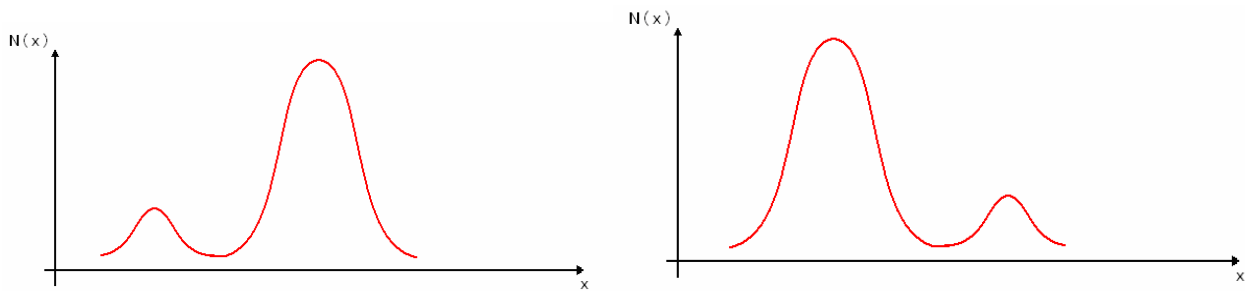
$$R = \int_0^R dx = \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_n(E) + S_e(E)}$$

### 10.4 Channeling

Il channeling è un fenomeno che si verifica nell'impiantazione ionica in substrati monocristallini. Ha luogo quando gli ioni incidenti sono allineati con una direzione cristallina principale (vedi figura)



Il soli meccanismo di arresto degli ioni è la collisione elettronica, e la distanza percorsa dagli ioni impiantati è notevolmente maggiore che in un substrato amorfo. Il profilo di concentrazione è ancora di tipo gaussiano, ma si può notare la presenza di una seconda gaussiana (a destra o a sinistra della distribuzione principale) che rappresenta appunto tutti gli ioni interessati dal channeling:

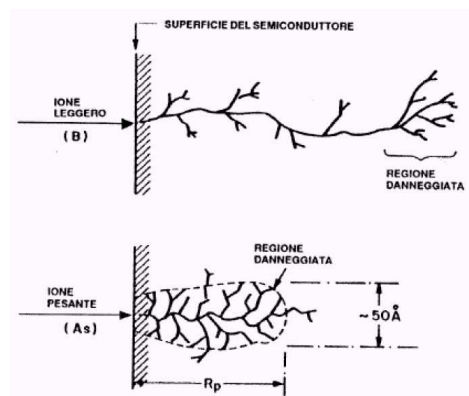


Una delle tecniche per evitare l'effetto del channeling consiste nell'inclinare di un angolo di ampiezza arbitraria, il substrato, in modo da far incidere il fascio ionico in una direzione diversa da quella cristallina principale. In alternativa è possibile eliminare l'effetto del channeling, prevedendo l'andamento della distribuzione di ioni ed effettuando l'impiantazione ionica in un substrato di silicio ricoperto da uno strato di ossido in cui verrà impiantata la distribuzione non desiderata. A questo punto è possibile rimuovere gli ioni nell'ossido con una delle seguenti tre tecniche:

- ◆ Bombardamento dell'ossido con elettroni. Ogni elettrone neutralizza uno ione riducendo progressivamente la carica libera (devo far attenzione a non inserire più elettroni del necessario altrimenti l'ossido diviene carico negativamente).
- ◆ Metallizzazione della superficie dell'ossido e rimozione degli ioni mediante l'azione di un campo elettrico (drenaggio delle cariche).
- ◆ Creazione di zone separate di ossido in cui "ingabbiare" le cariche libere.

### 10.5 Danneggiamento reticolare

Le collisioni degli ioni impiantati, con i nuclei degli atomi del substrato, possono spostare questi ultimi dai loro siti originari dando origine a dislocazioni. Gli atomi colpiti, a loro volta, possono causare una cascata di dislocazioni e creare un albero di disordine reticolare:



I siti danneggiati vengono riportati alla loro struttura originaria mediante il processo di annealing (ricottura). Questo è un trattamento termico ad elevata temperatura che cede energia al sistema. Al successivo raffreddamento il sistema tende a riportarsi nella sua struttura "naturale" recuperando parte dei difetti. Le temperature di esercizio ( $700 \div 800 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) sono sufficientemente basse da non attivare processi diffusivi. In alternativa si utilizza una tecnica di annealing mirato nella zona danneggiata (mediante cannoni laser), che non agisce sulle zone circostanti, già prive di danneggiamenti.

In conclusione è possibile dire che utilizzando la tecnica dell'impiantazione ionica unita a quella dell'accrescimento epitassiale, è possibile ottenere prodotti di elevata qualità che non risentono dell'effetto channeling.