



# Impiantazione ionica

---

Francesco Biagini

Ph.D student

[francesco.biagini@phd.unipi.it](mailto:francesco.biagini@phd.unipi.it)

Dipartimento di ingegneria  
dell'informazione – Università di Pisa

Centro di ricerca Enrico Piaggio

# Impiantazione Ionica

Tecnica usata per drogare i wafer di silicio



Si basa sul fatto che, essendo gli ioni carichi elettricamente, possono essere accelerati, deflessi e concentrati elettricamente.

In questo modo è possibile andare ad impiantare ioni anche in «piccole» quantità di materiale

# Impiantazione Ionica

## Vantaggi

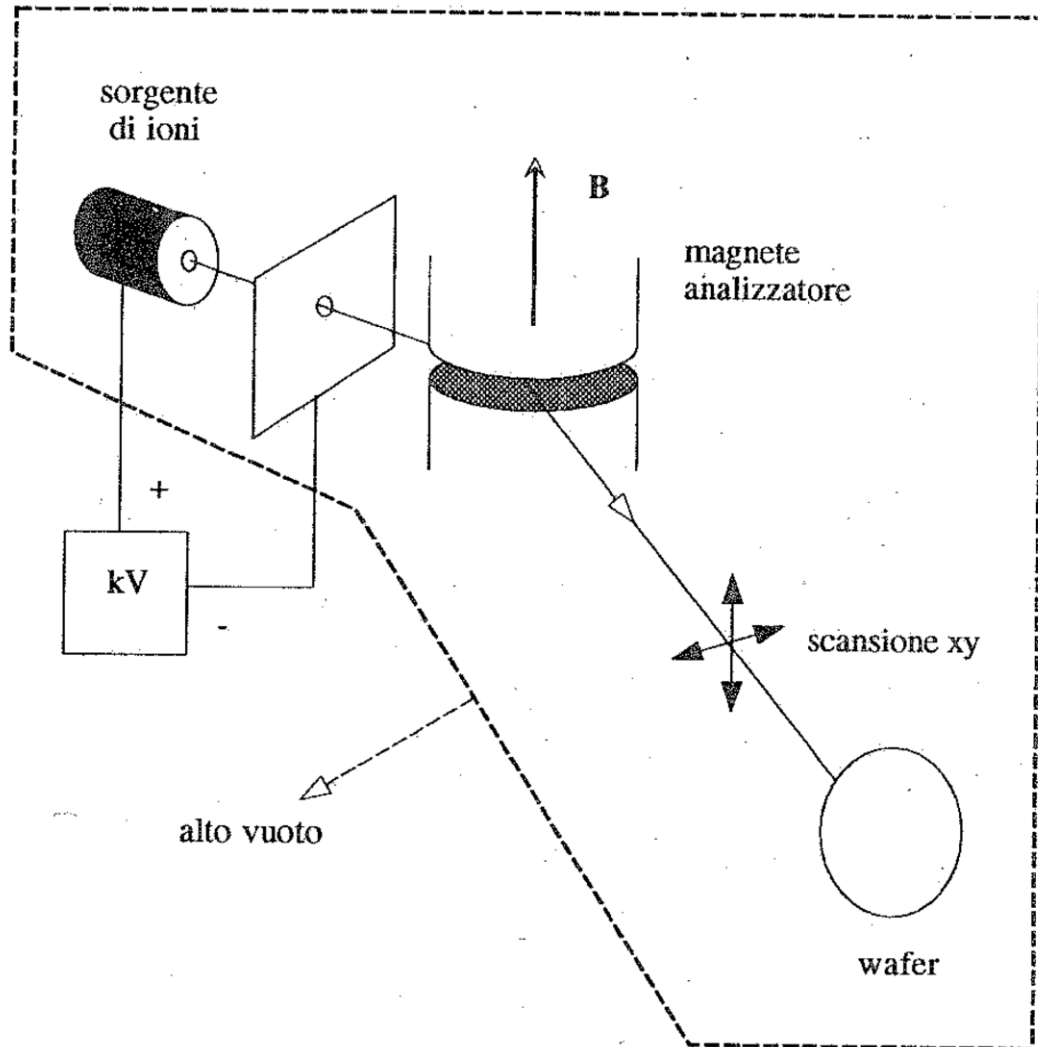
- I livelli di drogaggio possono essere controllati in maniera precisa (in quanto il raggio ionico può essere definito in maniera accurata dall'intensità di corrente)
- L'uniformità del drogaggio può essere controllata in maniera accurata
- La profondità viene regolata scegliendo l'energia del raggio incidente
- Il processo è a bassa temperatura (non problematico per il silicio ma per altri semiconduttori)
- La purezza del drogante è garantita da un'analisi di massa del raggio ionico
- Poca diffusione laterale del drogante
- Possono essere inseriti droganti che di base non sono solubili o che non diffondono nel materiale di base

# Impiantazione Ionica

## Svantaggi

- Macchinari costosi e difficili da utilizzare
- Le giunzioni non vengono passivate automaticamente
- Si possono avere dei danneggiamenti alla struttura cristallina

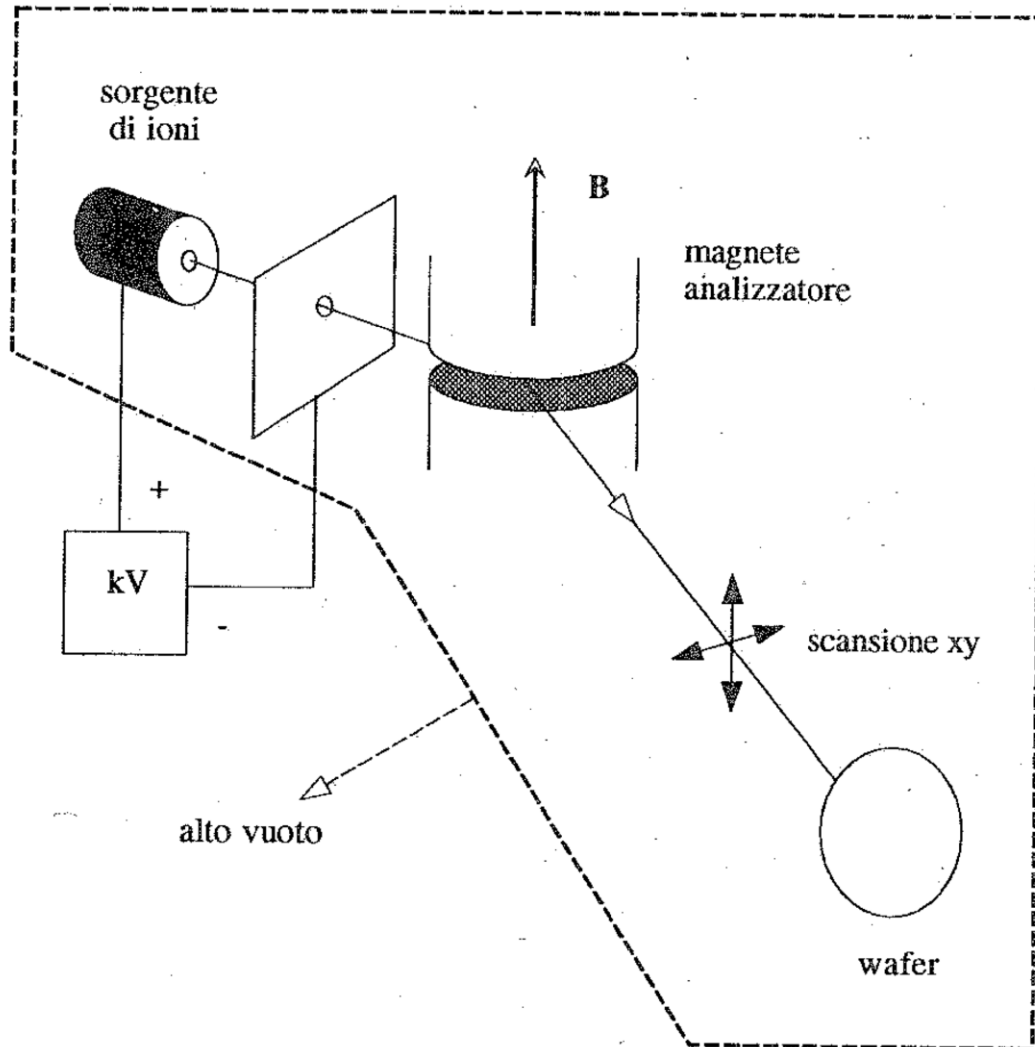
# Impiantazione Ionica



Gli ioni della specie drogante vengono quindi accelerati attraverso differenze di potenziale tra i 10 e i 500 kV (filtrati per eliminare contaminati) e vengono deflessi in modo da illuminare uniformemente il bersaglio

Gli ioni incidono sul wafer e, dopo aver subito una serie di collisioni, si arrestano in posizione interstiziale o sostituzionale

# Impiantazione Ionica

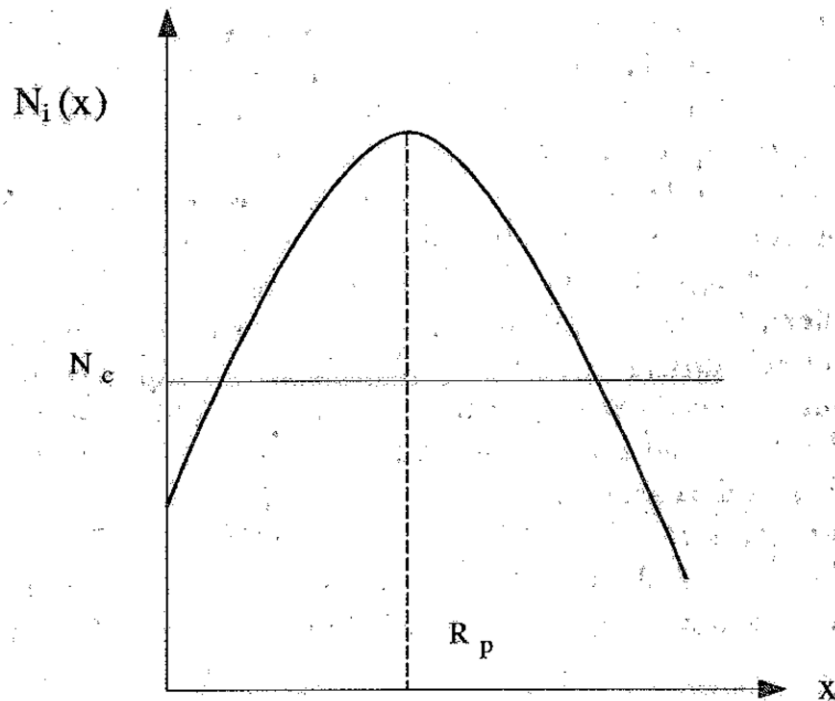


Il fascio ionico trasporta correnti che vanno da  $1 \mu\text{A}$  fino a  $15 \mu\text{A}$

Il numero di ioni impiantato può essere facilmente misurato tramite la carica associata alla particella

**N.B. Il profilo di impiantazione non coincide con il profilo di drogaggio**

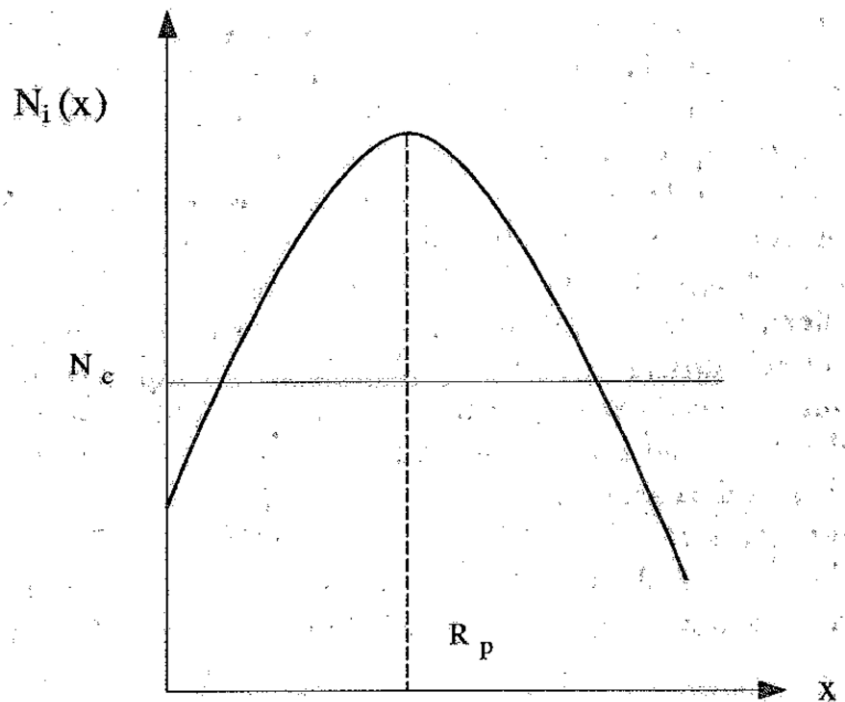
# Impiantazione Ionica



$x$  : profondità di impatto;  
 $R_p$  : range proiettato (media);  
 $\Delta R_p$  : dev. Standard;  
 $N_o$  : la dose di impianto

$$N_i(x) = \frac{N_o}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} e^{-\left(\frac{x-R_p}{\sqrt{2}\Delta R_p}\right)^2}$$

# Impiantazione Ionica

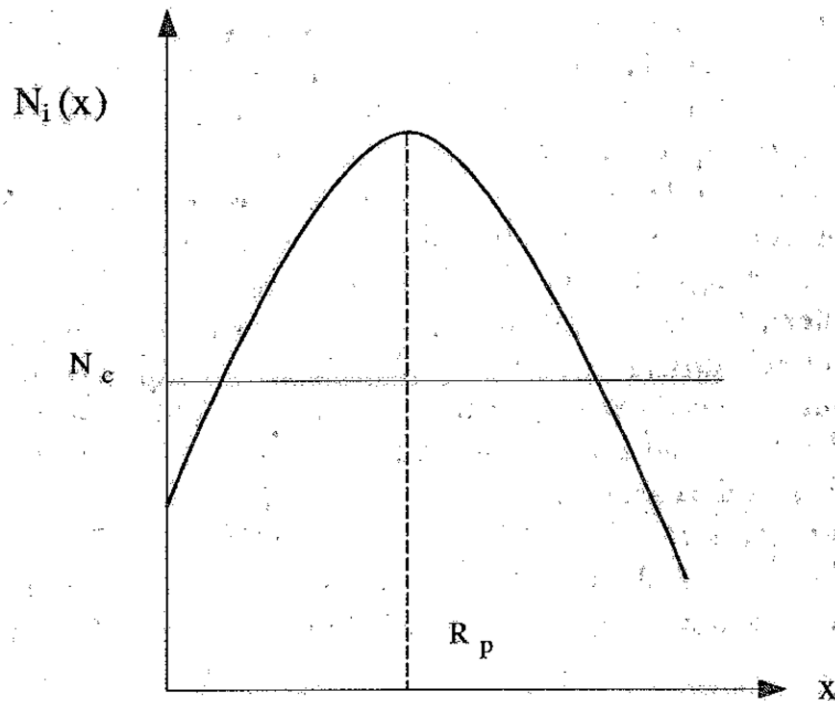


$R_p$  e  $\Delta R_p$  dipendono dal tipo di ione, dall'energia dello ione e dal tipo di substrato

**A differenza della diffusione, in cui il massimo del profilo si ha per  $x=0$ , in questo caso  $R_p$  assume un valore  $>0$**



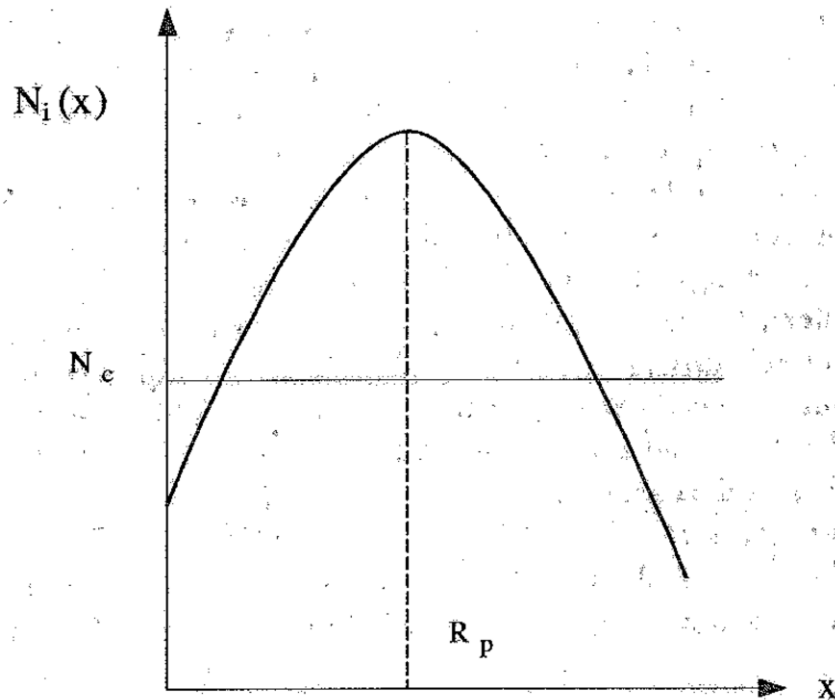
# Impiantazione Ionica



L'area della gaussiana rappresenta la dose mancante

**L'area mancante ( $x < 0$ ) rappresenta gli ioni che sono andati perduti (collisioni tali da comportarne la riflessione al di fuori del target)**

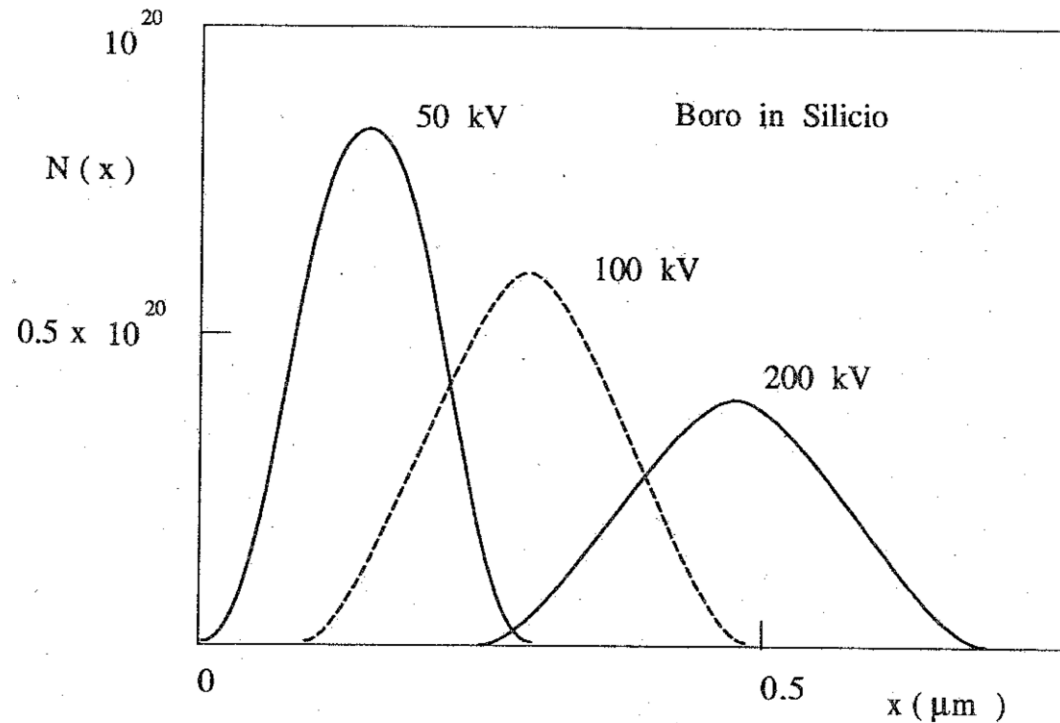
# Impiantazione Ionica



Gli ioni possono anche penetrare in posizione ortogonale rispetto alla direzione principale

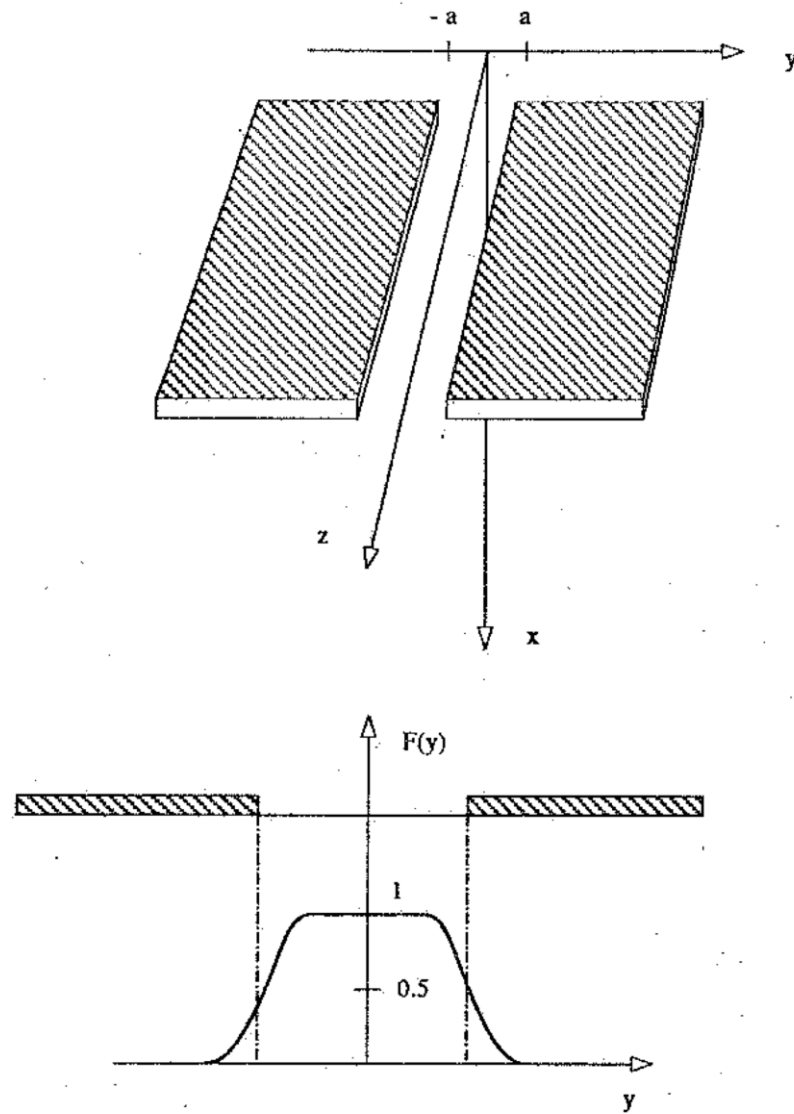
**Il fenomeno risulta comunque minore rispetto alla diffusione**

# Impiantazione Ionica

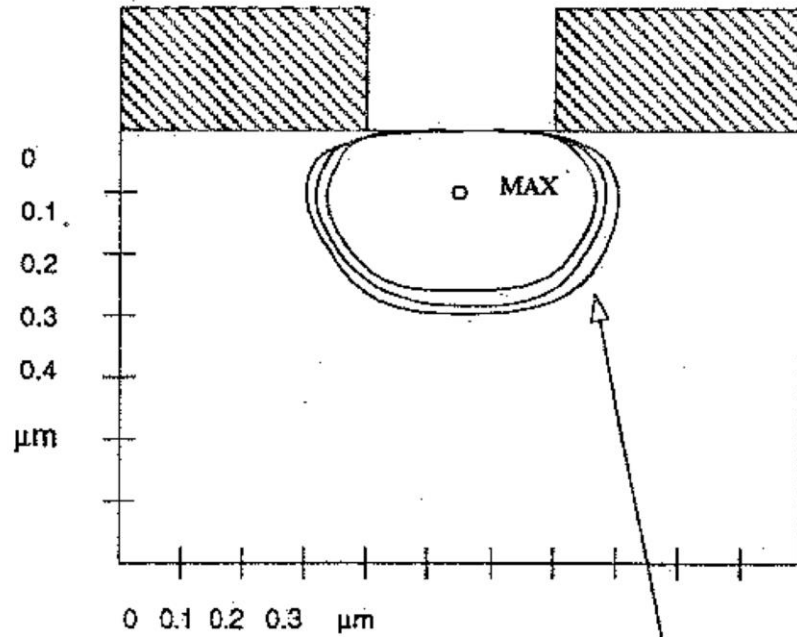


Con successive impiantazioni (a diverse energie) è possibile effettuare un drogaggio quasi costante su una estesa zona in direzione  $x$

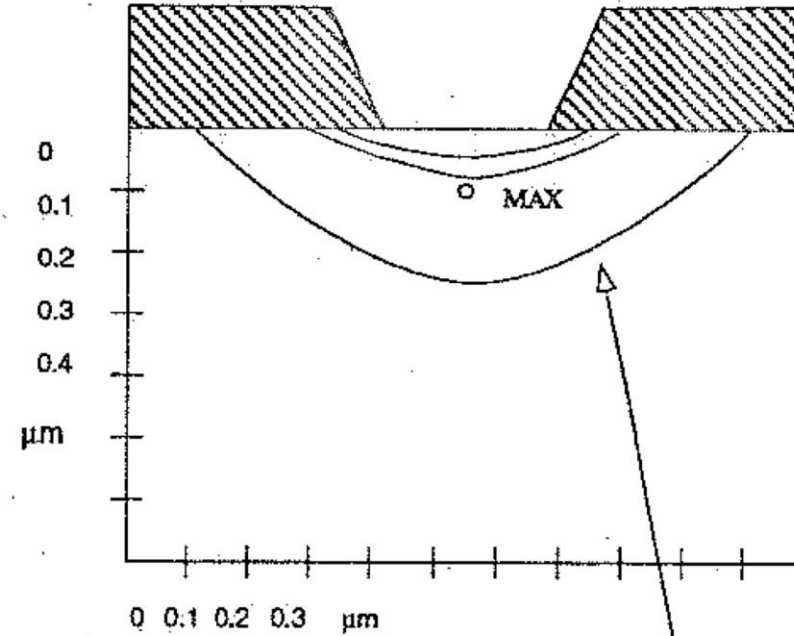
# Impiantazione Ionica



# Impiantazione Ionica



LINEE DI UGUALE  
CONCENTRAZIONE



LINEE DI UGUALE  
CONCENTRAZIONE

# Impiantazione Ionica

Ad energie dello ione incidente minori di 100 keV abbiamo i seguenti meccanismi di collisione che determinano il frenamento:

- **Collisioni ione-nuclei nel substrato**
- **Interazioni ione-elettroni del substrato**

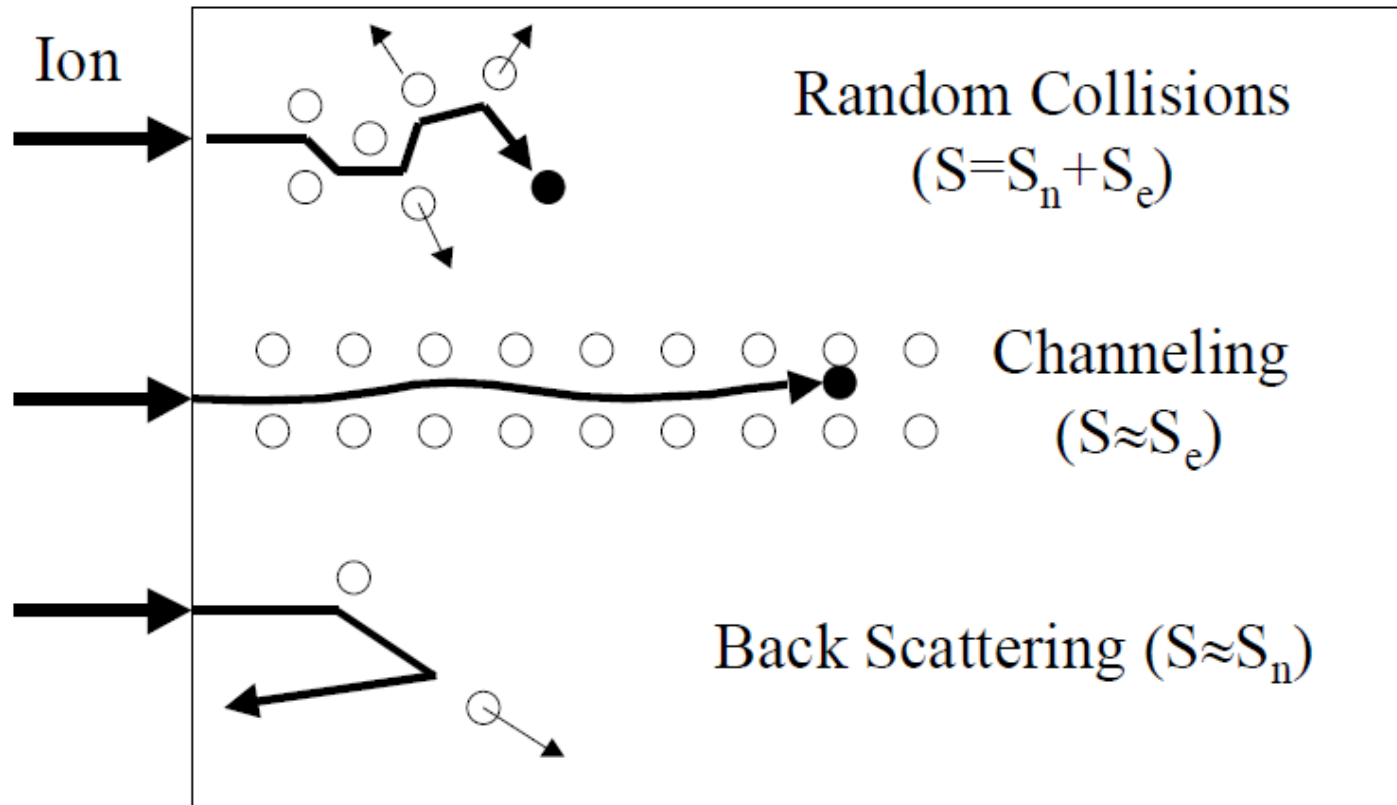
Definendo come potere frenante la perdita di energia dello ione incidente per unità di lunghezza

$$S = -\frac{dE}{dx}$$

Combinando con i due poteri frenanti si ottiene (teoria di Lindhard, Scharff e Schiott):

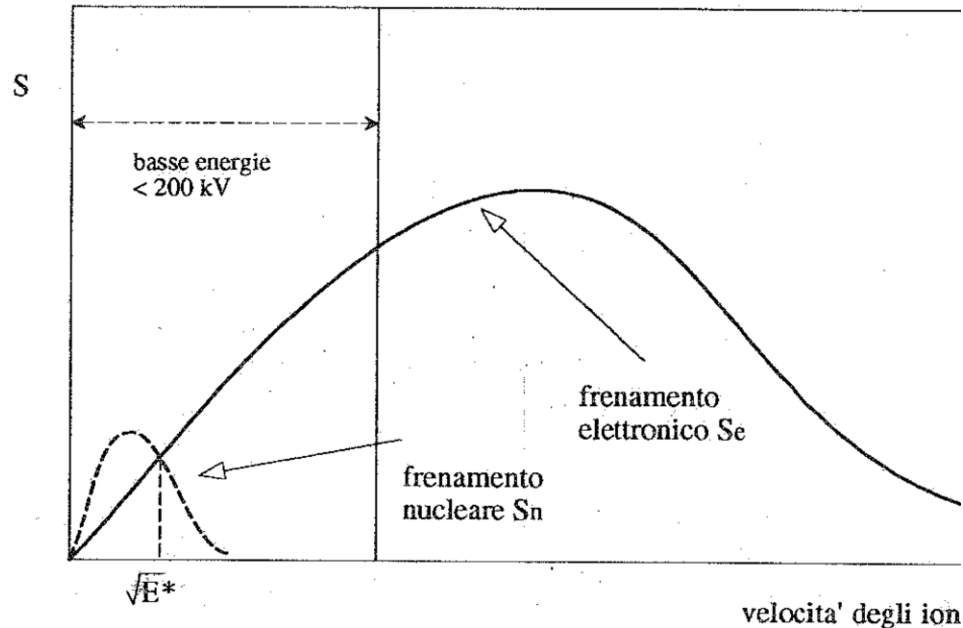
$$-\frac{dE}{dx} = N(S_n + S_e)$$

# Impiantazione Ionica



L'interazione con gli elettroni non produce danneggiamento mentre la collisioni con i nuclei tendono a rimuovere questi ultimi dalle loro posizioni di equilibrio con conseguente produzione di difetti (vacanze, interstiziali)

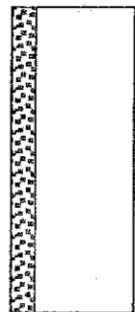
# Impiantazione Ionica



## Andamento qualitativo di Sn e Se

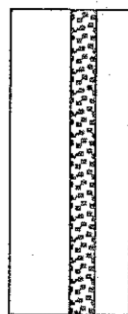
Si noti che uno ione ad alta energia non produce danneggiamento lungo il suo percorso fino a che, avendo raggiunto una energia critica  $E^*$  per effetto del frenamento elettronico, comincia a perdere energia prevalentemente a causa delle collisioni con i nuclei del reticolo.

Viceversa una impiantazione a bassa energia produce un danneggiamento superficiale.



impiantazione a bassa energia ;  
danneggiamento superficiale

perdita di energia prevalentemente per frenamento nucleare

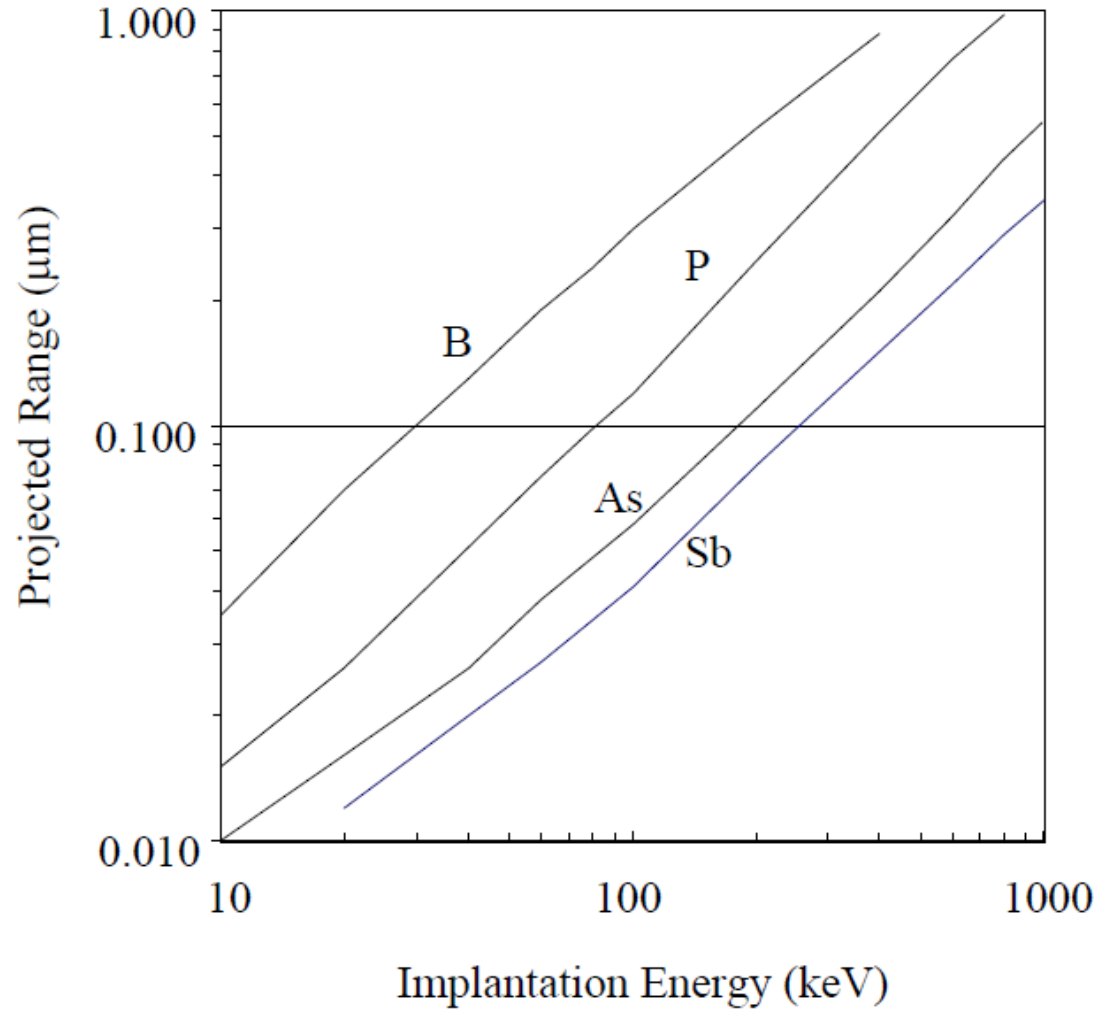


impiantazione ad alta energia :  
danneggiamento profondo

perdita di energia prima per frenamento elettronico, poi per frenamento nucleare  
(  $E < E^*$  )

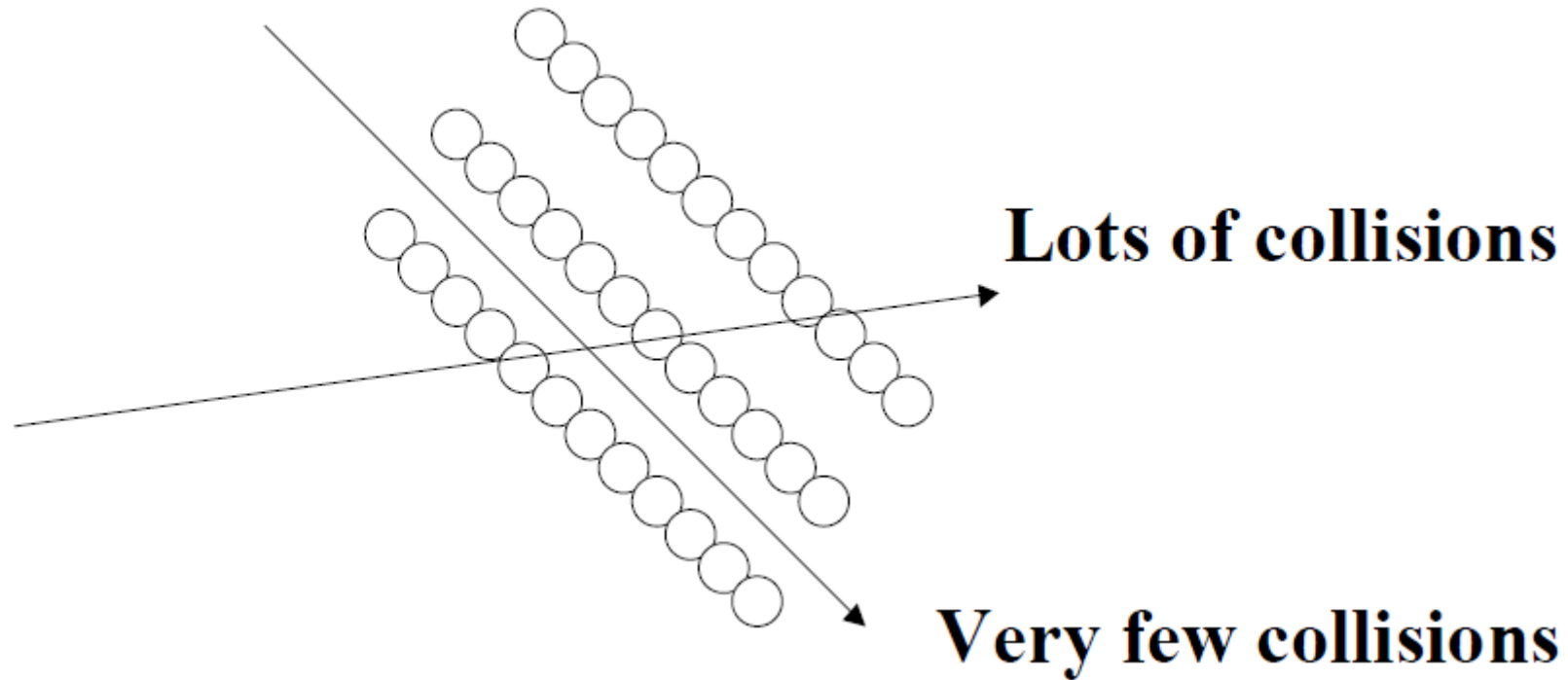


# Impiantazione Ionica



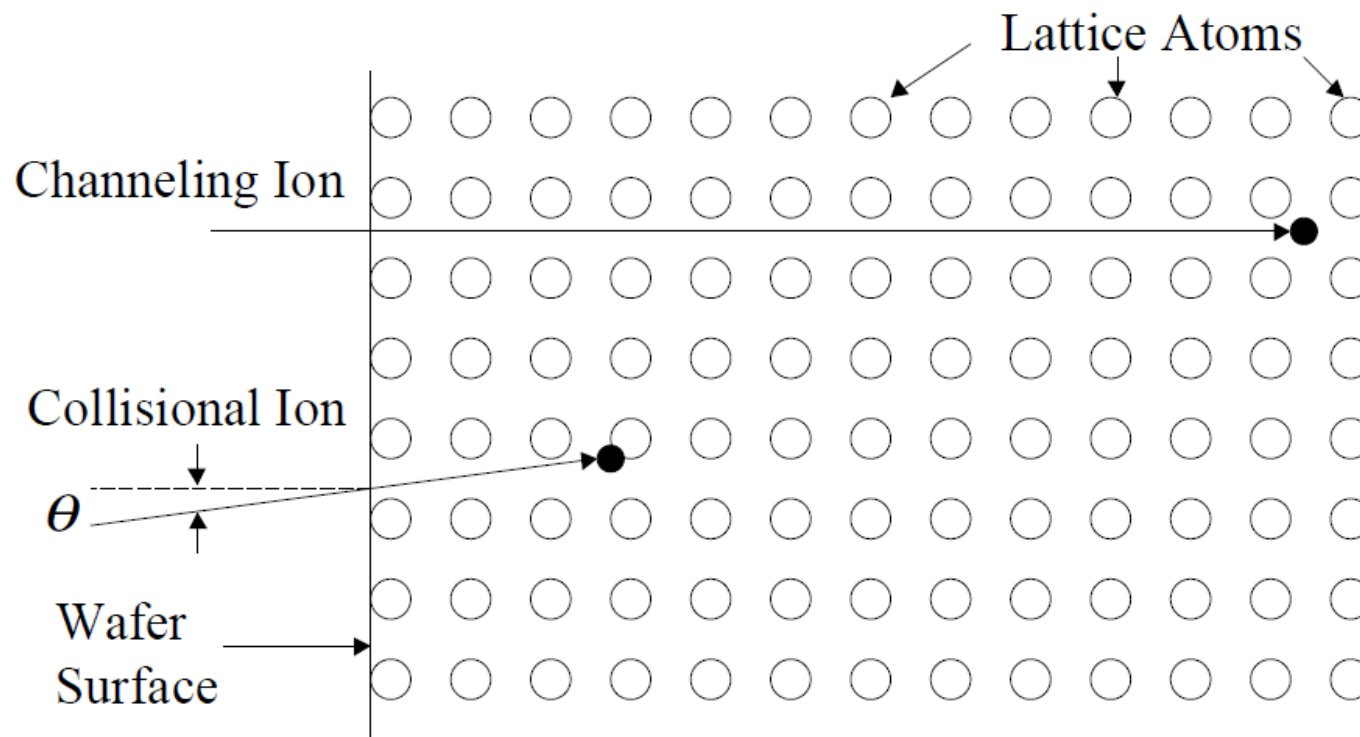
ione	$E^*$ (keV)
<i>B</i>	17
<i>P</i>	140
<i>As</i>	800
<i>Sb</i>	2000

# Impiantazione Ionica



Consequente riduzione del potere frenante nella parte finale del percorso e quindi una maggiore penetrazione

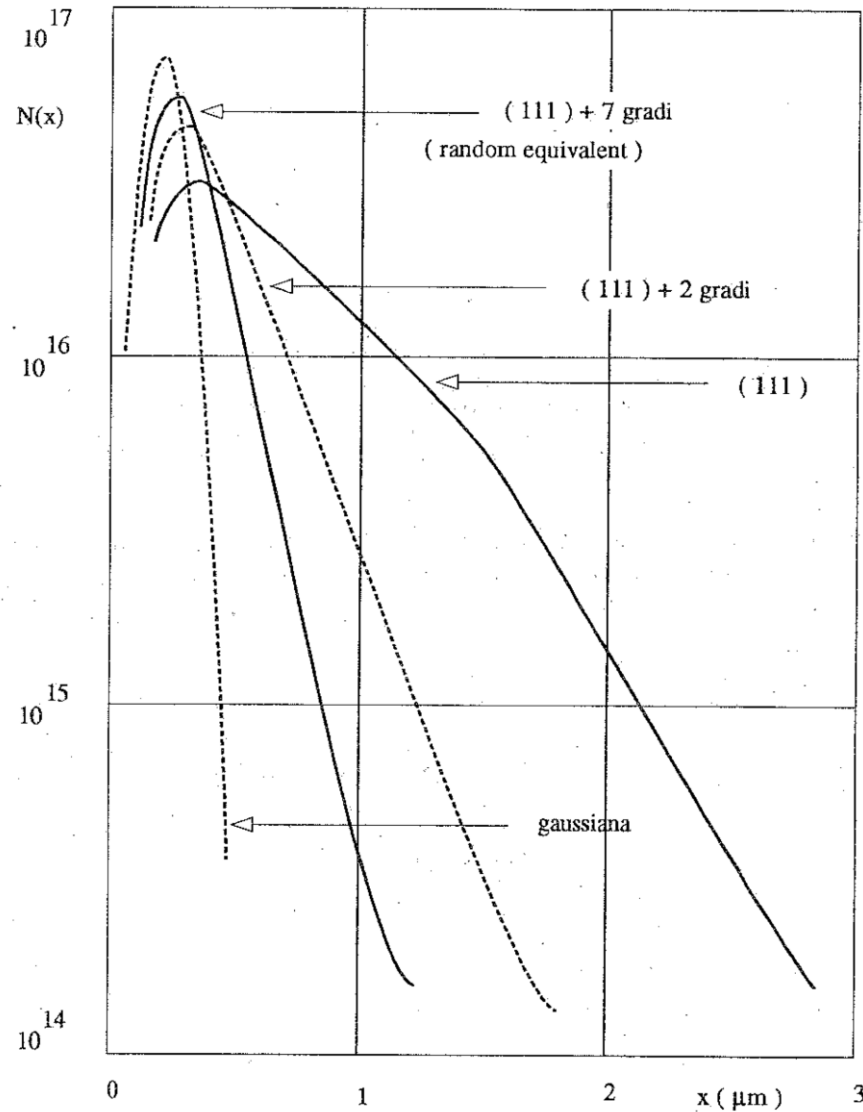
# Impiantazione Ionica



Possibili rimedi:

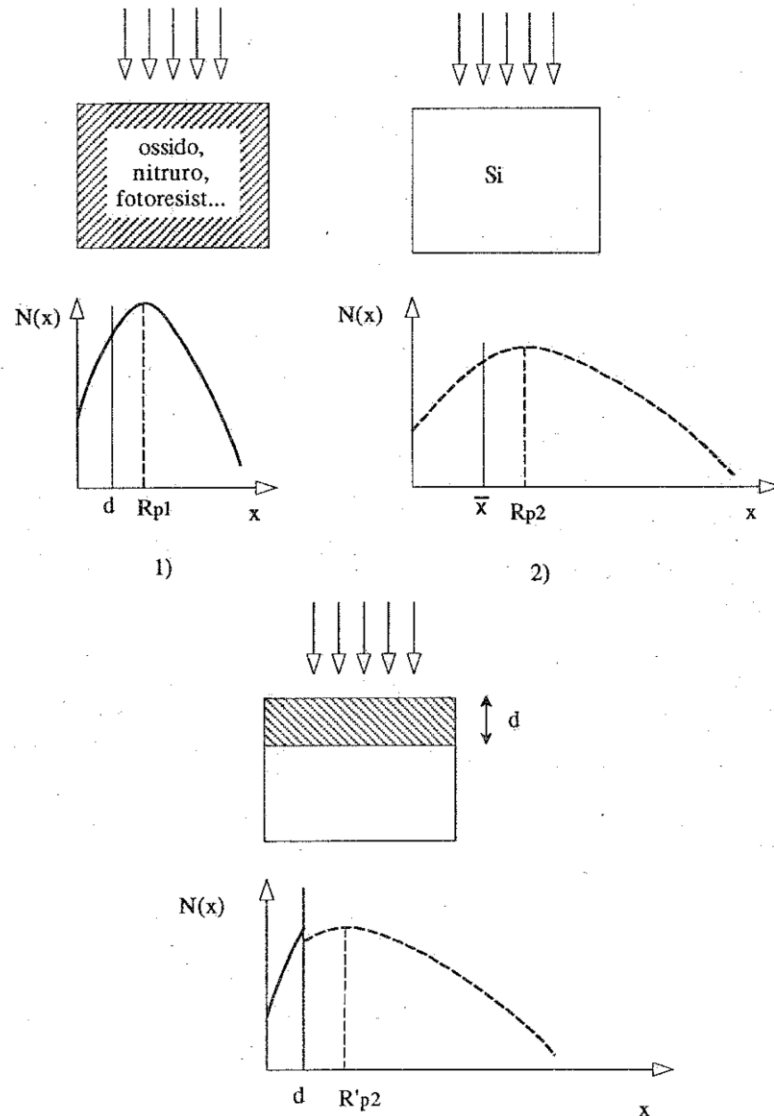
- Inclinare il substrato
- Fare l'impianto su un substrato amorfo (ossido di silicio)

# Impiantazione Ionica



**Effetto del cambio di inclinazione su un substrato 111**

# Impiantazione Ionica

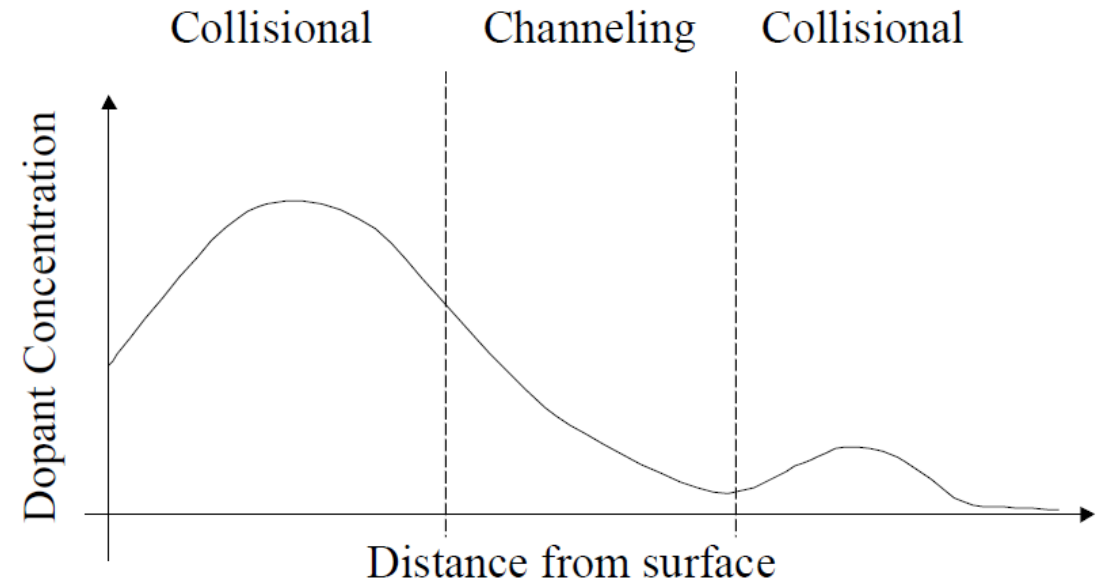
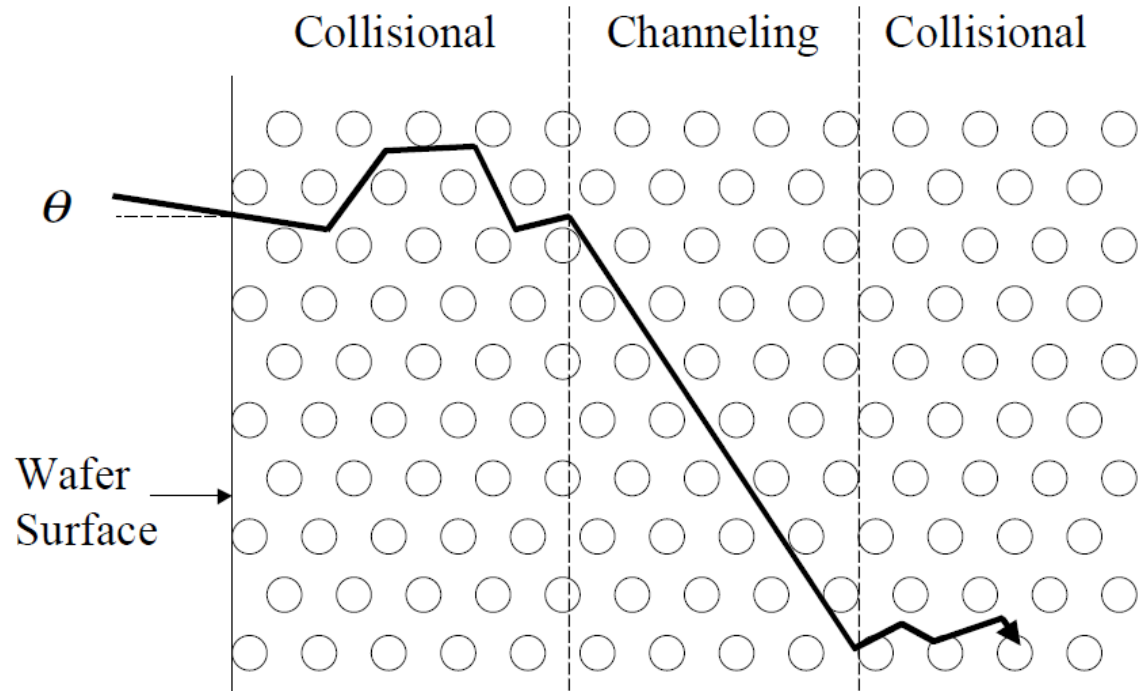


## Effetto del impianto su substrato amorfo

- 1) Si determina il profilo di concentrazione come se l'impianto avvenisse nell'ossido (profilo1)
- 2) Si determina il profilo di concentrazione come se l'impianto avvenisse nel substrato senza ossido (profilo 2)
- 3) Il profilo 1 e lo spessore dello strato di ossido  $d$  determinano quanto drogante c'è realmente nell'ossido
- 4) Nota questa quantità si calcola sul profilo 2 la ascissa  $X$  dove tagliare il profilo
- 5) Si uniscono i due profili

# Impiantazione Ionica

## Post-collisional channeling

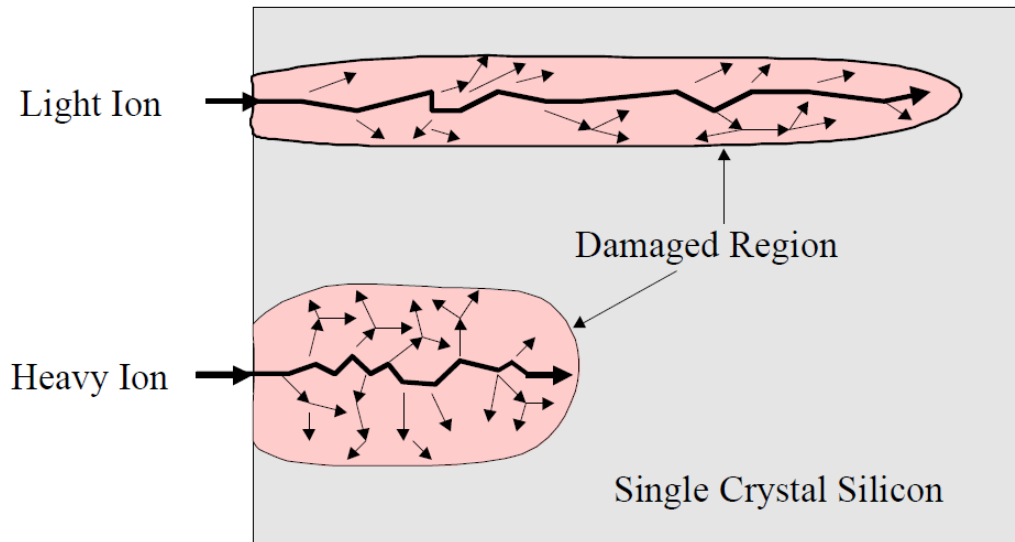


# Impiantazione Ionica

## Dopo l'impiantazione ionica???

Danni dovuti  
all'impiantazione

Riallineare i  
difetti



Gli atomi droganti devono essere allineati e legati ad atomi di silicio in modo da essere attivati da donatori (n) o accettori (p)

# Impiantazione Ionica

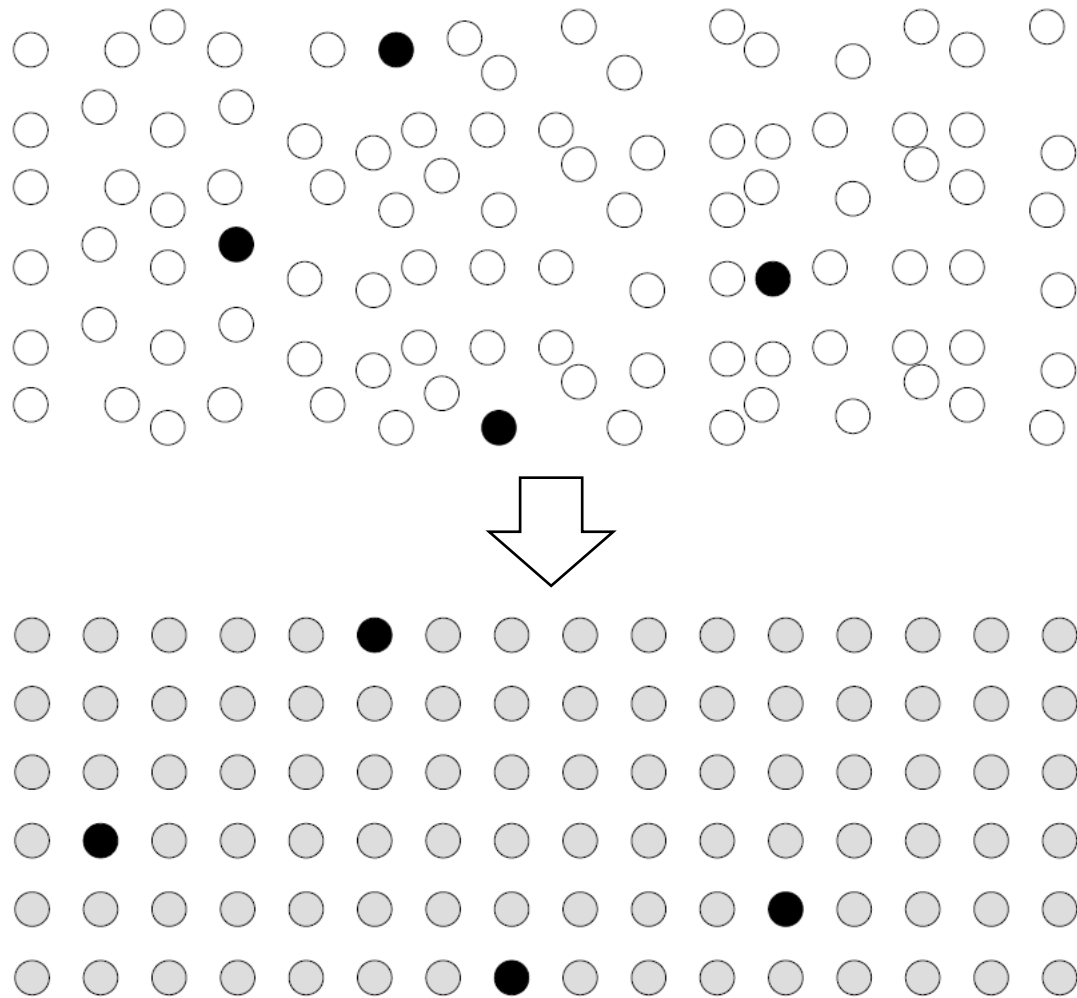
## Annealing

L'annealing è indispensabile per attivare la dose impiantata, per rendere cioè coincidenti il profilo impiantato con il profilo di drogaggio ma anche per ricristallizzare il substrato spesso danneggiato dall'impianto.

È necessario che l'annealing non alteri troppo il profilo impiantato



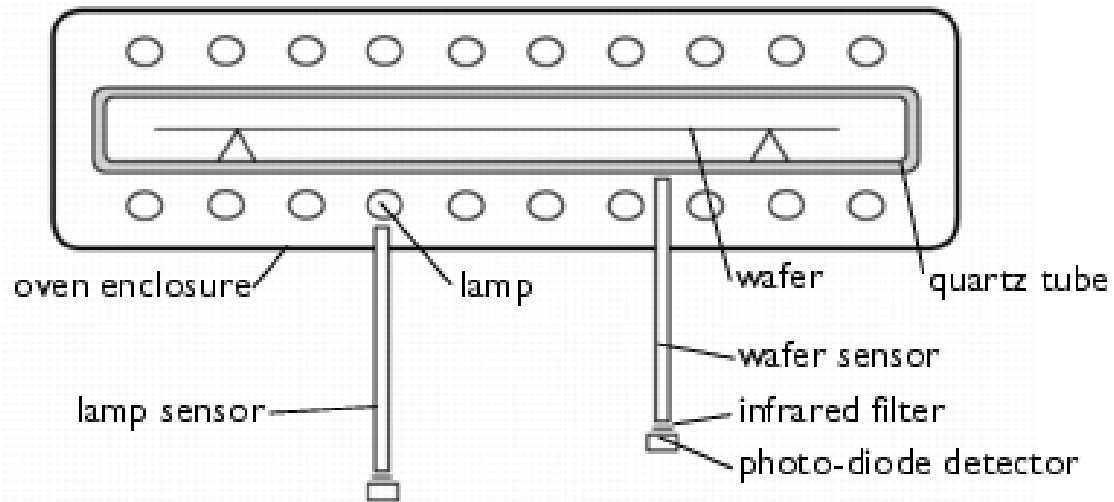
# Impiantazione Ionica



## Annealing convenzionale

- Viene effettuato in forno con atmosfera inerte.
- L'interfaccia amorfo/cristallo si muove verso la superficie ad una velocità che dipende dalla temperatura, dal drogaggio e dall'orientamento del cristallo.
- La ricristallizzazione è dovuta al movimento dei difetti puntiformi
- Processo economico ma molto lento

# Impiantazione Ionica



## Annealing Termico Rapido

- Necessario quando si vuole minimizzare il processo diffusivo del profilo impiantato

# Impiantazione Ionica

Può essere:

- **Adiabatico :**
  - Tempo di riscaldamento molto breve ( $<10^{-7}$ ).
  - La superficie del film fonde e ricristallizza.
- **A flusso termico :**
  - è un processo che utilizza un gas caldo e inerte;
  - tempo di riscaldamento compreso tra  $10^{-7}$  e 1 s;
  - Rasterizzazione del wafer di silicio;
  - si possono usare fasci elettronici, laser o lampade alogene; questo spinge i difetti verso la parte in fondo del wafer;
- **Isotermico:**
  - Tempo di riscaldamento di qualche secondo
  - Illuminazione su un'area vasta

# Impiantazione Ionica

## Valutazione degli strati impiantati e diffusi

Considerando un parallelepipedo del materiale in oggetto di lunghezza  $l$ , larghezza  $w$  e spessore  $x_i$ , la resistenza  $R$  in direzione parallela ad  $l$  è definita come:

$$R = \rho \frac{l}{wx_i}$$

Dove  $\rho$  è la resistività del materiale

# Impiantazione Ionica

## Valutazione degli strati impiantati e diffusi

Nel caso in cui il materiale sia un semiconduttore drogato in direzione  $x$ , l'espressione precedente (che presuppone una resistività costante) non può essere usata

Per questo motivo

$$R = \bar{\rho} \frac{l}{wx_i} = \frac{1}{\bar{\sigma} x_i} \frac{l}{w}$$

Dove  $\bar{\sigma}$  è definita dalla relazione

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{x_i} \int_0^{x_i} q\mu_n(x)n(x)dx$$

# Impiantazione Ionica

## Valutazione degli strati impiantati e diffusi

In questo modo si ha

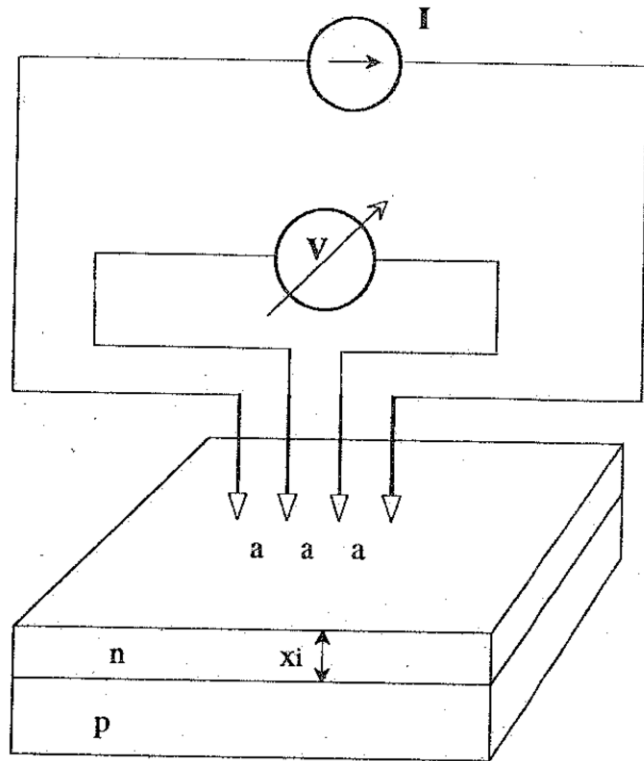
$$R = \frac{\rho_{\blacksquare} l}{w}$$

Dove  $\rho_{\blacksquare}$  è la resistenza di strato e rappresenta la resistenza di un quadrato di lato  $w$  (indipendentemente da  $w$ ).

Se è quindi possibile misurare  $\rho_{\blacksquare}$ , per conoscere il valore della resistenza di una interconnessione di geometria assegnata basta sapere di quanti quadrati essa è costituita.

# Impiantazione Ionica

## Valutazione degli strati impiantati e diffusi



$$V = \frac{I\bar{\rho}}{\pi x_i} \ln(2) = \frac{0,22I}{x_i} \bar{\rho}$$

Nel caso in cui  $x_i \ll a$  si ottiene:

$$\rho_{\blacksquare} = 4,532 \frac{V}{I} = F \frac{V}{I}$$

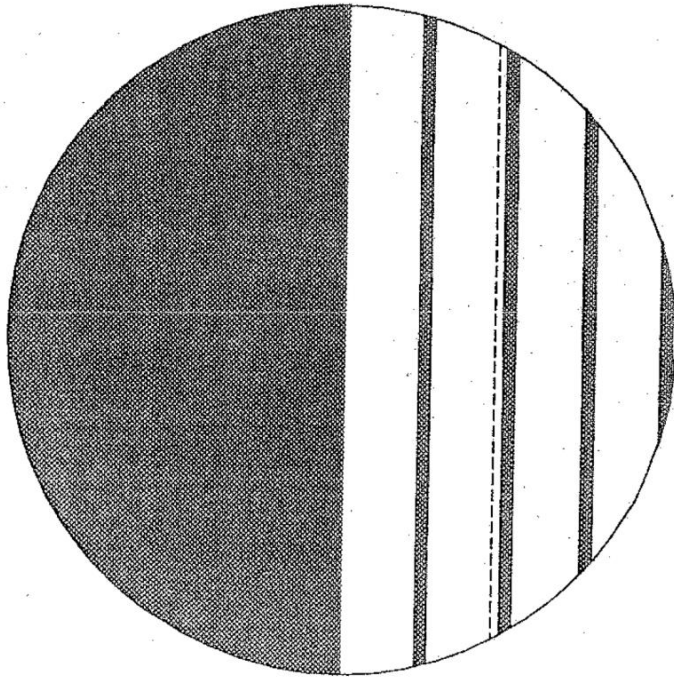
Dove i valori di F (fattore di forma) sono tabulati

**(N.B. il sistema è difficile da implementare)**

# Impiantazione Ionica

## Misura della profondità di giunzione, $x_j$

### Metodo interferometrico



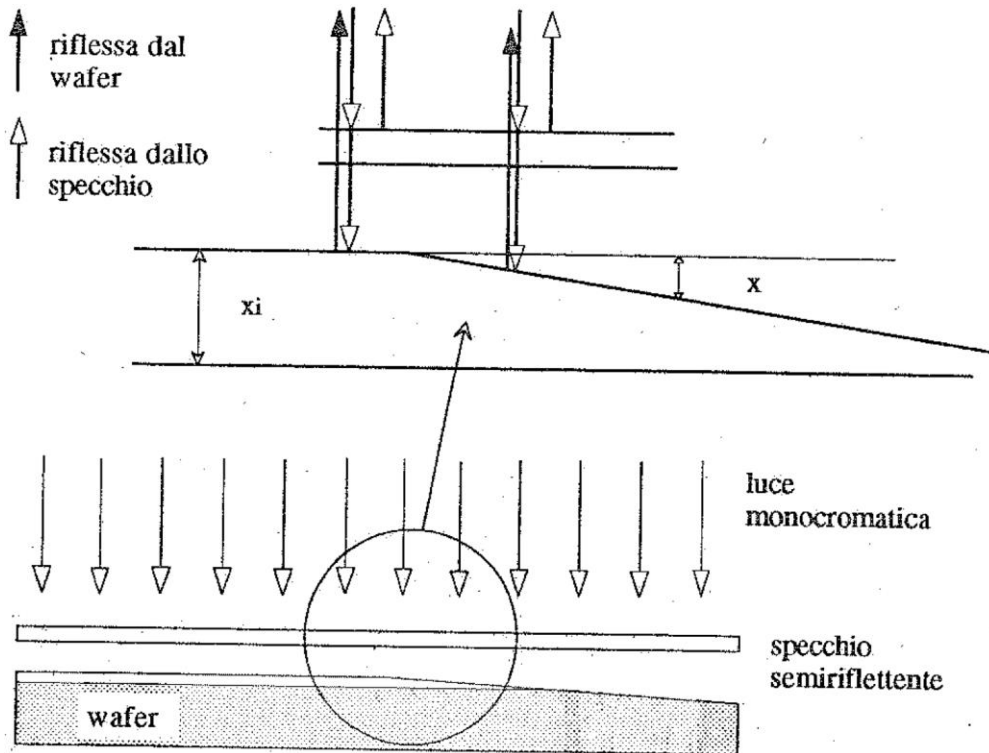
- Lappatura di una fetta a basso angolo ( $1-3^\circ$ ) in modo da amplificare la zona di giunzione.
- Immersione in una soluzione di  $\text{HF} + \text{CuSO}_4$  dove il rame si deposita selettivamente sulla zona n
- La regione di giunzione viene evidenziata dal diverso colore



# Impiantazione Ionica

## Misura della profondità di giunzione, $x_j$

### Metodo interferometrico



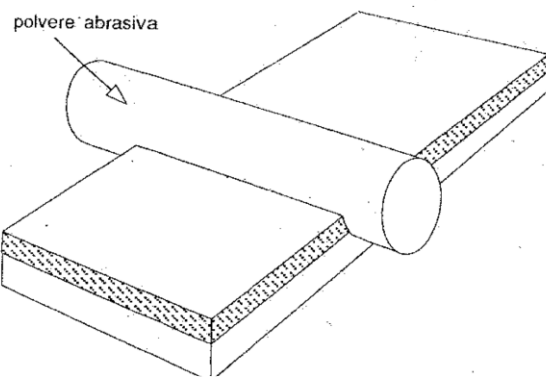
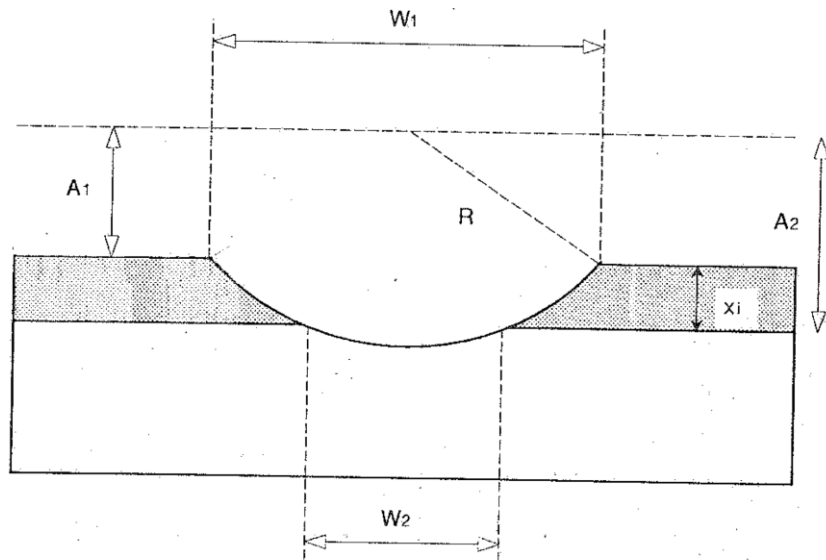
- Si invia luce monocromatica attraverso uno specchio opportunamente posizionato in modo che in corrispondenza della zona piatta del wafer le onde EM riflesse dal wafer stesso e dallo specchio si sommino in controfase
- Stessa cosa succede nella zona lappata quando  $x$  è multiplo intero di  $\lambda/2$
- Il numero di frange scure fornisce il valore di profondità

# Impiantazione Ionica

## Misura della profondità di giunzione, $x_j$

### Metodo groove and stain

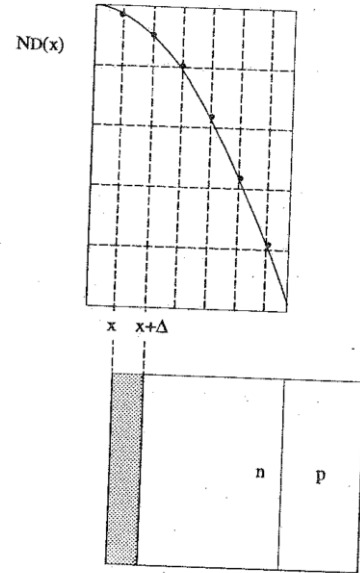
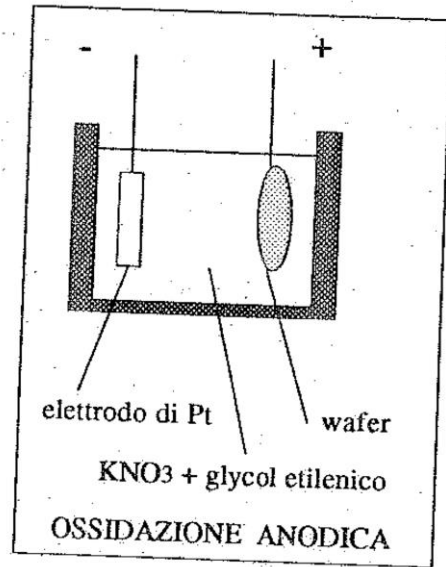
- Si tratta di scavare il wafer
- L'immersione nella soluzione vista in precedenza permette di riconoscere e misurare le distanze  $W_1, W_2$



$$x_i = A_2 - A_1$$

$$x_i = \left[ R^2 - \left( \frac{W_1}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} - \left[ R^2 - \left( \frac{W_2}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

# Impiantazione Ionica



## Misura della profondità di giunzione, $x_j$ Metodo groove and stain

- Metodo alternativo: ossidazione anodica
  - Si va a creare un ossido (di spessore noto) e successivamente si rimuove
  - Ogni volta si fa una misura della resistenza con il metodo delle 4 punte

