

Capitolo 5

IMPIANTAZIONE IONICA

5.1 Generalità

È una tecnica di drogaggio alternativa alla diffusione (in alcuni casi la sola utilizzabile) che presenta i seguenti vantaggi:

1. miglior controllo della dose (dose minima dell'ordine di 10^{11} cm^{-2} contro 10^{14} cm^{-2} ottenibile con la diffusione),
2. processo a bassa temperatura;
3. possibilità di drogare anche attraverso uno strato di SiO_2 ;
4. molti materiali, compreso il fotoresist, possono essere impiegati come barriera contro l'impiantazione;
5. si osserva bassa penetrazione laterale del drogante (ossia lateralmente rispetto alle finestre ricavate per fotolitografia che definiscono le zone in cui si intende drogare il semiconduttore);
6. si ha la possibilità di ottenere un'ampia varietà di profili di drogaggio.

Gli ioni della specie drogante, accelerati da differenze di potenziale comprese fra 10 e 500 kV, filtrati per eliminare contaminanti e deflessi in modo da illuminare uniformemente il bersaglio (figura 1), incidono

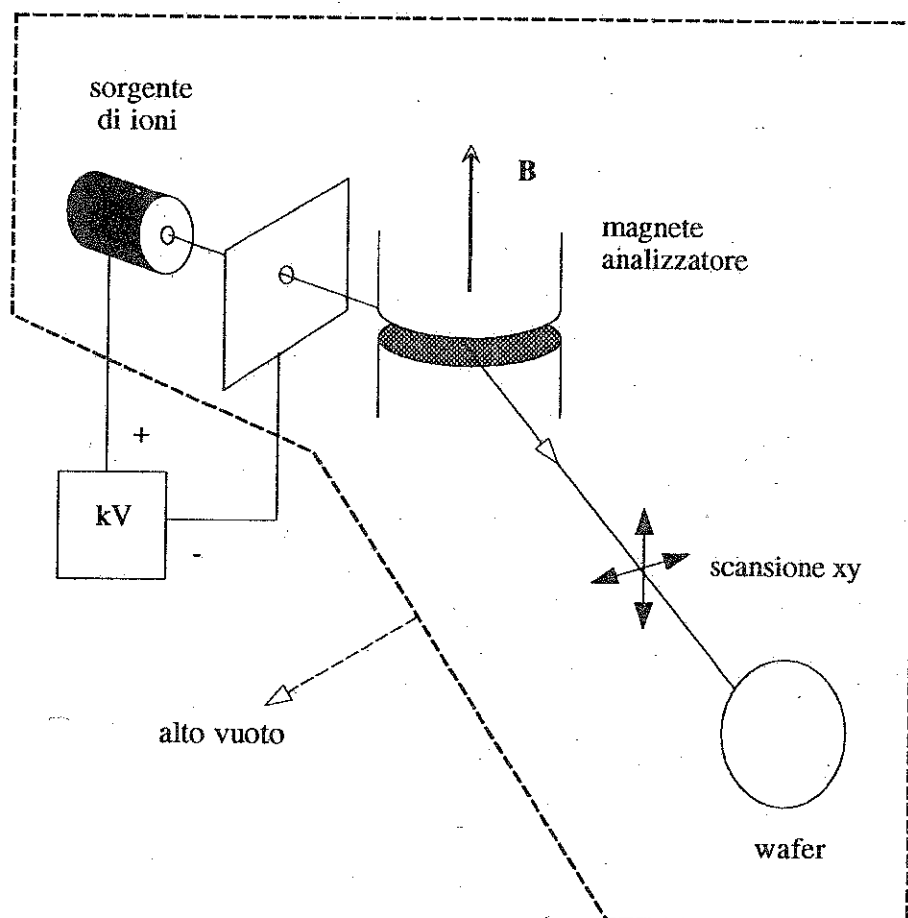


Figura 5.1: Schema a blocchi dell'impiantatore.

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

Il fascio ionico (monoenergetico) trasporta correnti da $1 \mu A$ a $15 \mu A$; il numero di ioni impiantati può essere facilmente misurato tramite la carica associata alla particella. Le moderne macchine per impiantazione di uso industriale possono contenere fino a 100 fette da drogare. Il profilo di impiantazione, che non coincide con il profilo di drogaggio poiché, come detto, non tutti gli ioni occupano posizioni sostituzionali, è, in funzione di x (profondità di impianto), una gaussiana con valor medio R_p (range proiettato) e deviazione standard ΔR_p , nella ipotesi semplificativa che il substrato sia completamente amorfo. R_p è detto range proiettato (in direzione x) proprio perché rappresenta la proiezione lungo quest'asse del range R , ovvero dell'effettivo percorso dello ione all'interno del target. Su scala logaritmica il profilo di impianto $N_i(x)$ è quindi una parabola con vertice in R_p e concavità rivolta verso il basso (figura 2).

Indicando con N_\diamond la dose di impianto, cioè la quantità di drogante impiantata sull'area unitaria, il profilo di impianto assume l'espressione:

$$N_i(x) = \frac{N_\diamond}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp - \left[\frac{(x - R_p)}{\sqrt{2}\Delta R_p} \right]^2$$

R_p e ΔR_p dipendono da (figura 3):

- tipo di ione,
- energia dello ione,
- tipo di substrato.

A differenza della diffusione, in cui il massimo del profilo si ha per $x = 0$, R_p in generale assume un valore $x > 0$. Si osservi che con successive impiantazioni ad energie diverse è possibile effettuare un drogaggio quasi costante su una estesa zona in direzione x . L'area della gaussiana costituisce la dose impiantata e l'area mancante (quella sottesa dalla curva per $x < 0$) rende ragione degli ioni che sono andati perduti avendo subito collisioni tali da comportarne la riflessione al di fuori del target.

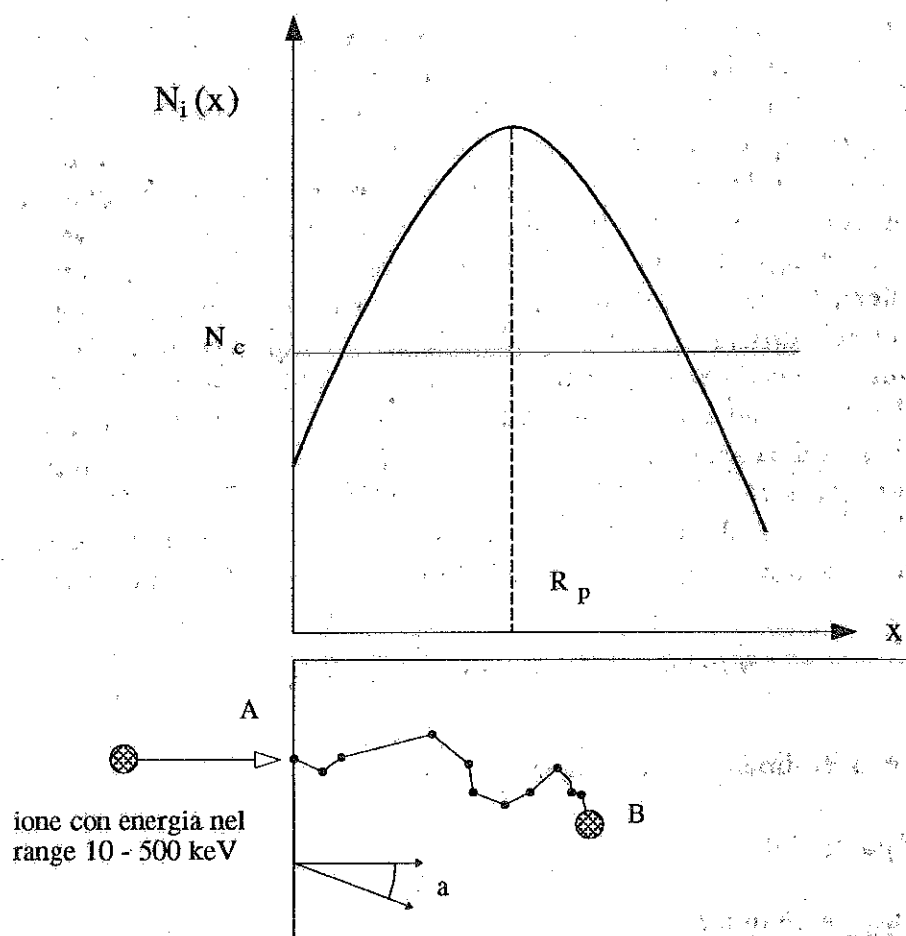


Figura 5.2: Profilo di impianto (sulle ordinate la scala è *logaritmica*).

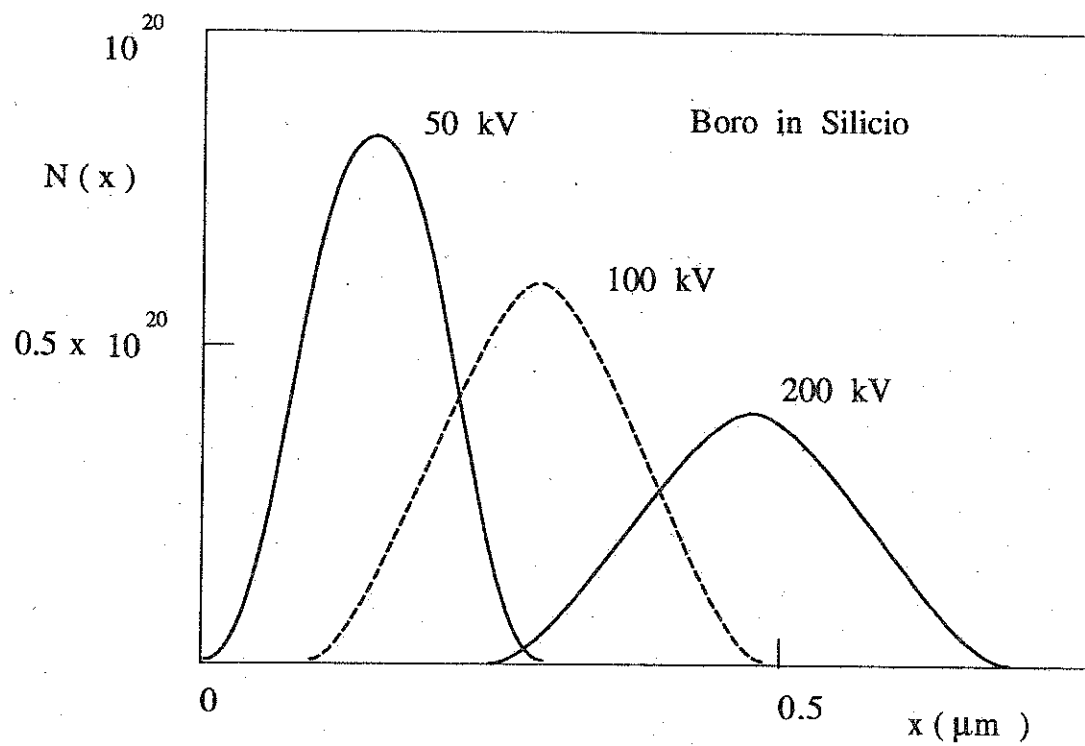


Figura 5.3: Profili teorici di impianto di boro in silicio per varie energie dello ione incidente.

Gli ioni, penetrando nel reticolo, possono anche essere deviati in direzioni che hanno una componente ortogonale alla direzione di incidenza; ne risulta, ai bordi della maschera, una impiantazione laterale (trascurabile rispetto all'analogo fenomeno che si osserva nel corso della diffusione) di cui bisogna tuttavia tenere conto nel caso di alta densità di integrazione.

Si supponga che la maschera lasci scoperta una fascia con $-a \leq y \leq a$ ($-\infty < z < \infty$) x essendo, come al solito, la direzione di impiantazione. Il grafico di figura 4 mostra, per ogni x , la frazione di drogante in direzione y . Si assume che la distribuzione in direzione y sia una semplice gaussiana con deviazione standard $\Delta R_{p\perp}$. Si osservi che l'impiantazione laterale dipende criticamente dal profilo del materiale usato per la mascheratura.

Poiché il profilo di impiantazione (PI) non coincide con il profilo di drogaggio (PD) (tale coincidenza richiede un successivo procedimento di annealing), la tecnica delle quattro punte combinata con l'ossidazione anodica non può essere usata per il rilievo del PI.

Ad energie dello ione incidente *minori di 100 KeV*, tra i meccanismi di interazione ione-substrato che determinano il frenamento dello ione, sono da ricordare

1. le collisioni ione-nuclei del substrato,
2. le interazioni ione-elettroni del substrato.

Lo ione incidendo sul substrato perde dunque energia sia collidendo con gli elettroni che con i nuclei del reticolo cristallino. Si indicano con S_n ed S_e i *poteri frenanti* dei nuclei e degli elettroni. Definiamo come potere frenante la perdita di energia dello ione incidente per unità di lunghezza ($-\frac{dE}{dx}$);

combinando i due poteri frenanti suddetti, secondo la teoria dovuta a Lindhard, Scharff e Schiøtt avremo:

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

dove N è la concentrazione di atomi del substrato. L'interazione con gli elettroni non produce danneggiamento, mentre le collisioni con

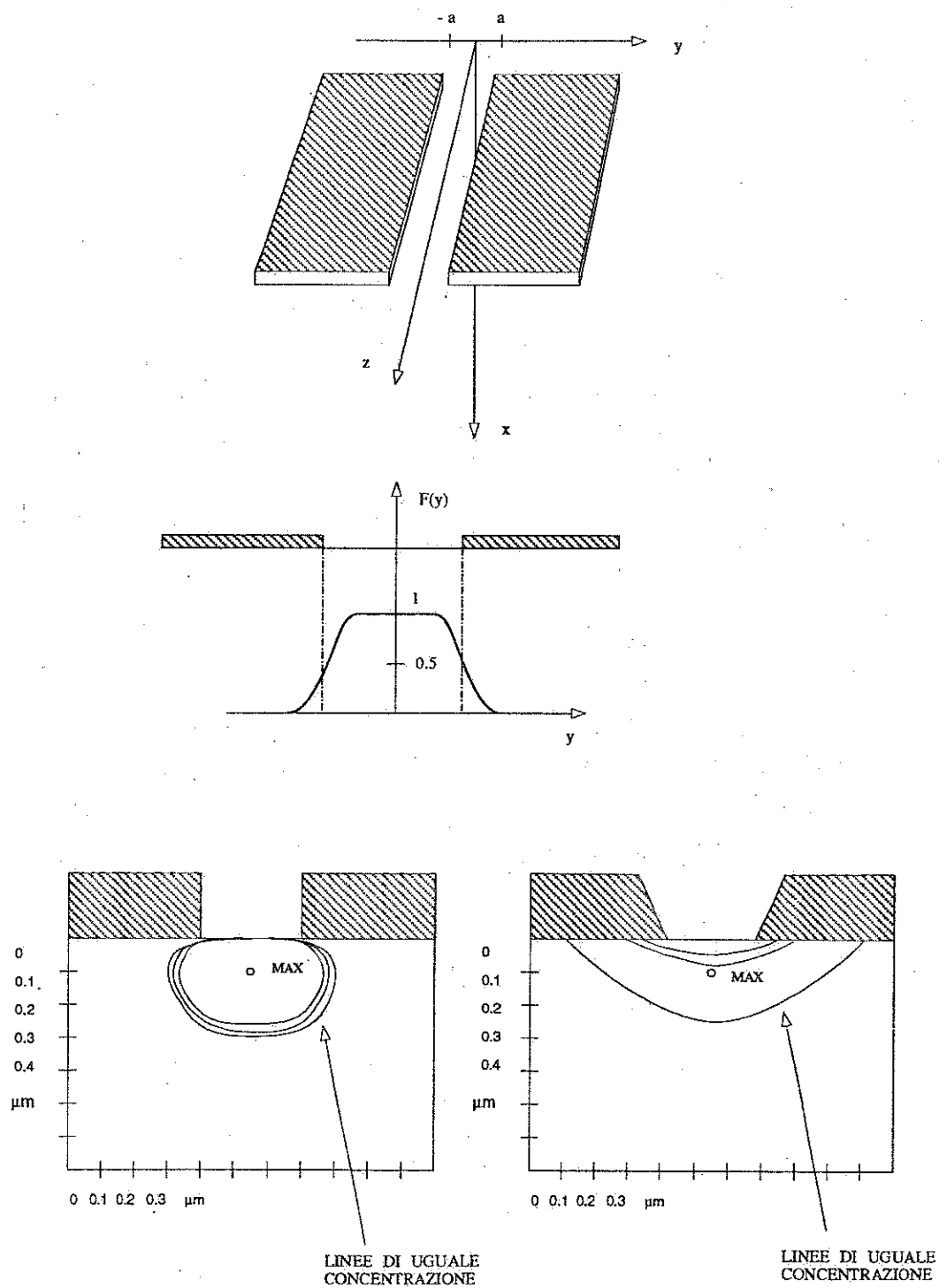


Figura 5.4: Effetto dell'impiantazione laterale.

i nuclei tendono a rimuovere questi ultimi dalle loro posizioni di equilibrio, con conseguente produzione di difetti (vacanze, interstiziali). L'entità del danno dipende ovviamente dalla dose impiantata; per alte dosi si può avere completa amorfizzazione del substrato.

Il grafico in figura 5 mostra l'andamento qualitativo di S_n e S_e ; 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 (danneggiamento localizzato in profondità). Viceversa una impiantazione a bassa energia produce danneggiamento superficiale (figura 5). Nella tabella sono indicati i valori di E^* per i droganti usuali nel silicio.

ione	E^* (keV)
B	17
P	140
As	800
Sb	2000

Il danneggiamento rende necessario un procedimento di annealing per ricostruire la natura cristallina del semiconduttore.

5.2 Channeling

L'ipotesi di substrato amorfo vale ad esempio per l' SiO_2 , ma non è certo valida per un substrato di silicio monocristallino. La figura 6 mostra un ipotetico cristallo a struttura cubica visto in una direzione parallela alla direzione cristallografica [100]. Risulta evidente la presenza di canali tra le file di atomi lungo i quali gli ioni penetrano subendo collisioni quasi esclusivamente da parte degli elettroni. Ne consegue un ridotto potere frenante nella parte finale del percorso e quindi una maggiore penetrazione (alterazione della parte destra del profilo di impiantazione). Inclinare il substrato può essere un rimedio contro l'effetto del channeling (figura 6). Altro rimedio può essere quello di impiantare attraverso

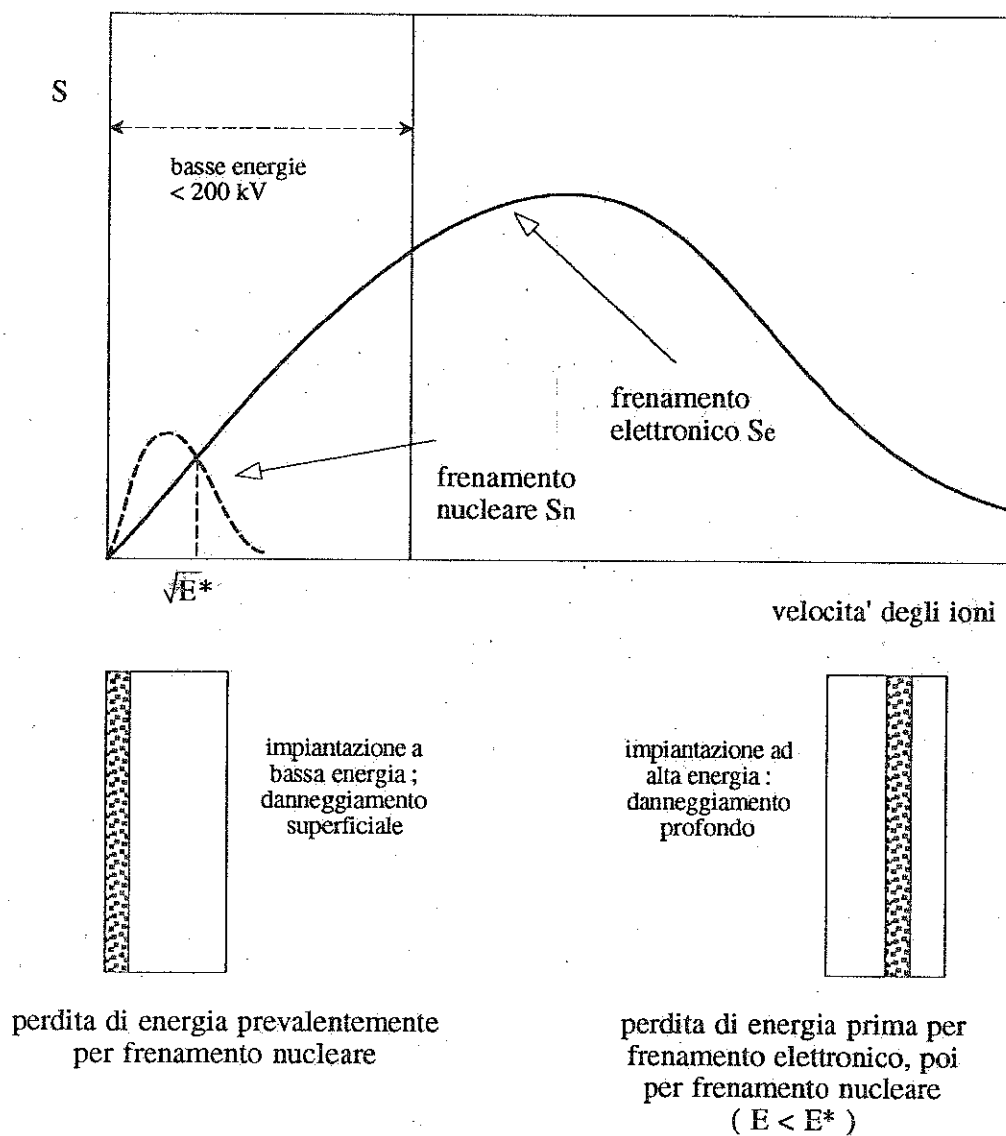


Figura 5.5: Danneggiamento da impiantazione; andamento delle componenti di frenamento elettronico e nucleare.

uno strato amorfo (ossido, resist) sovrapposto al target che rende casuali le traiettorie con cui gli ioni entrano nel substrato cristallino.

Nei profili di impianto riportati in figura 7 si osservino due cose:

- l'effetto pesante sul profilo di una impiantazione parallela alla direzione [111],
- che il profilo non è descritto da una semplice gaussiana neppure nel caso di randomizzazione con il metodo dello strato amorfo o dell'inclinazione del substrato.

Nei simulatori di processo vengono usate funzioni più complicate della gaussiana, come la Pearson di tipo IV, in cui compaiono anche momenti del terzo e quarto ordine. La distribuzione di Pearson di tipo IV è data dalla seguente espressione:

$$f(x) = k \left[b_2(x - R_p)^2 + b_1(x - R_p) + b_0 \right]^{\frac{1}{2b_2}} \cdot \exp \left\{ - \frac{\frac{b_1}{b_2} + 2a}{[4b_0b_2 - b_1^2]^{\frac{1}{2}}} \cdot \arctg \frac{\frac{b_1}{b_2} + 2b_2(x - R_p)}{[4b_0b_2 - b_1^2]^{\frac{1}{2}}} \right\}$$

dove k è una costante di normalizzazione e valgono le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} a = b_1 &= - \frac{\Delta R_p \gamma (\beta + 3)}{10\beta - 12\gamma^2 - 18} \\ b_0 &= - \frac{\Delta R_p^2 (4\beta - 3\gamma^2)}{10\beta - 12\gamma^2 - 18} \\ b_2 &= - \frac{2\beta - 3\gamma^2 - 6}{10\beta - 12\gamma^2 - 18} \end{aligned}$$

Se poi indichiamo con

$$R_p = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx$$

la media della distribuzione, e con

$$\mu_i = \int_{-\infty}^{\infty} (x - R_p)^i f(x) dx$$

il momento centrale dell' i -esimo ordine, risulta:

$$\Delta R_p = \mu_2^{1/2}$$

$$\gamma = \frac{\mu_3}{\Delta R_p^3}$$

$$\beta = \frac{\mu_4}{\Delta R_p^4}$$

Il momento centrale del terzo ordine γ , detto *asimmetria*, controlla l'inclinazione della distribuzione;

β , detta *curtosi*, modella la piattezza della curva nella zona di massimo.

Profili di impianto di ioni leggeri, più ripidi dalla parte della superficie, sono caratterizzati da distribuzioni con asimmetria negativa.

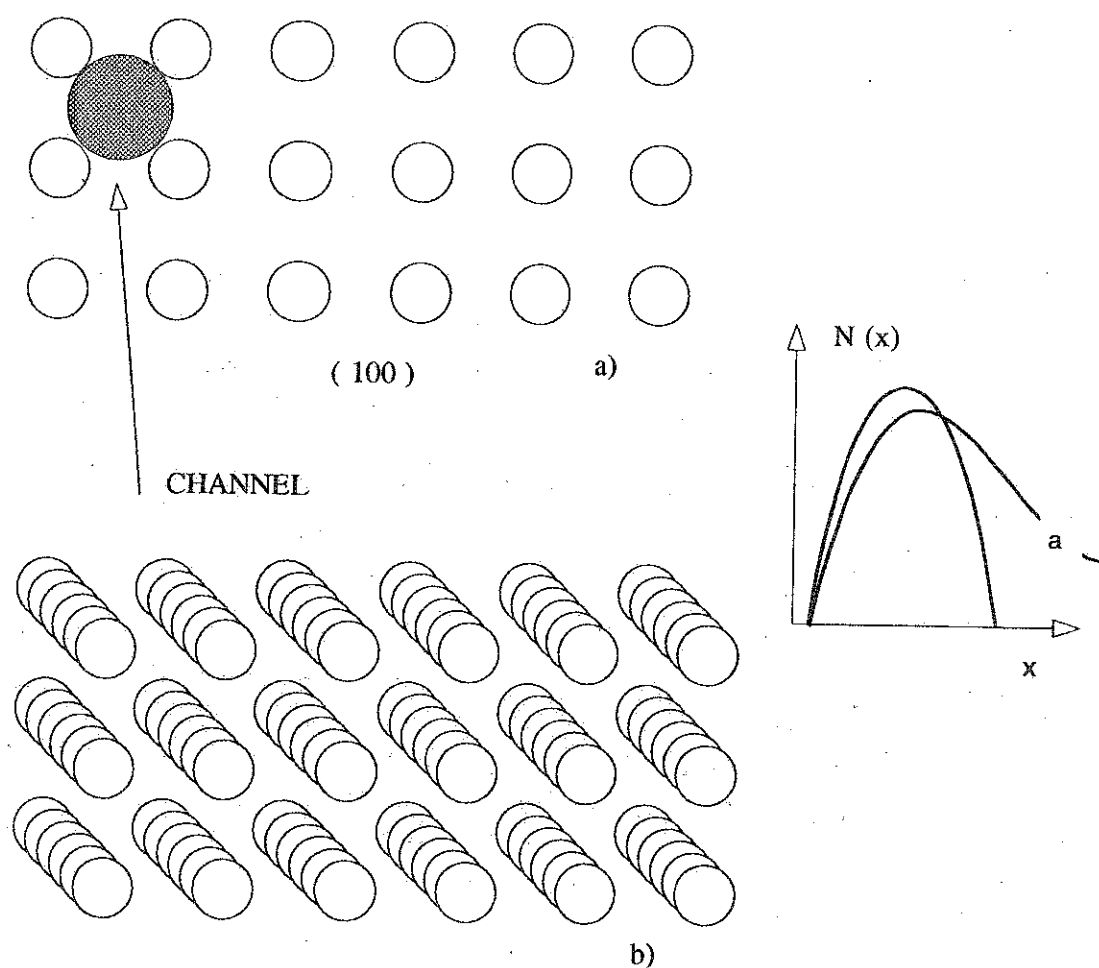
5.3 Annealing

L'annealing è indispensabile per attivare la dose impiantata (figura 8), 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.

5.3.1 Annealing convenzionale

Viene effettuato in forno con atmosfera inerte. Se il silicio è stato completamente amorfizzato, la ricristallizzazione avviene per epitassia in fase solida dello strato amorfo; l'interfaccia Si_a/Si_c si muove verso la superficie ad una velocità che dipende dalla temperatura, dal drogaggio e dall'orientamento del cristallo. La figura 8 è relativa a silicio non drogato.

Se l'impianto ha creato soltanto dei difetti, e non è stato sufficiente a creare uno strato amorfo, la ricristallizzazione è dovuta al movimento dei difetti puntiformi (energia di attivazione di ~ 5 eV).



Cristallo a struttura cubica visto

- a) da uno ione che incide con traiettoria parallela alla direzione (100)
- b) da uno ione la cui traiettoria forma un certo angolo rispetto alla direzione precedente (substrato disorientato).

Figura 5.6: Effetto di channeling: è mostrata la deformazione del profilo di impianto nel caso di channeling.

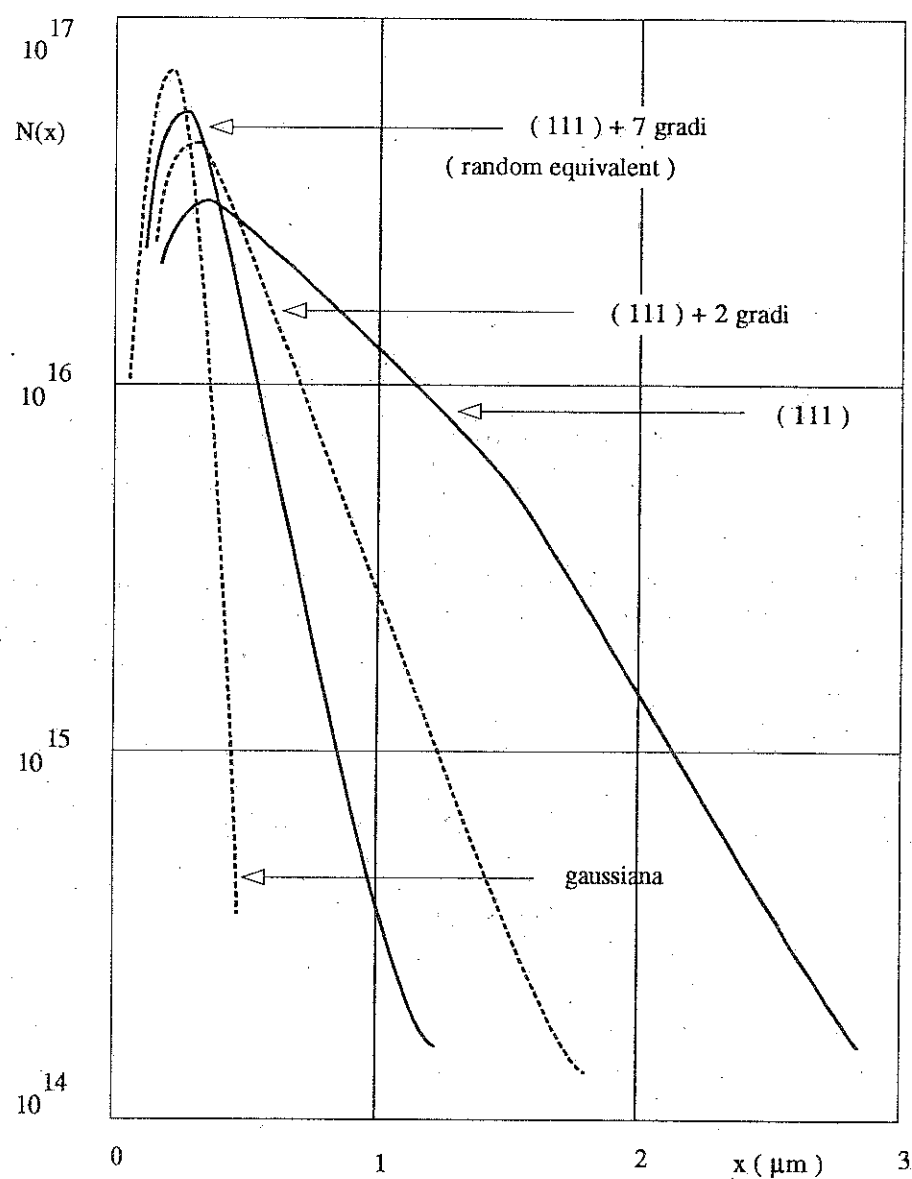


Figura 5.7: Profili di impianto nei casi di channeling, impianto random ed alcuni impianti con disallineamento del substrato; è mostrato il confronto col profilo gaussiano. Ione impiantato As , (300 kV) in silicio.

5.3.2 Annealing termico rapido (RTA)

L'annealing termico rapido si rende necessario quando si vuole minimizzare la diffusione del profilo impiantato durante la fase di annealing; (non è facile prevedere come si svolgerà durante questa fase il processo di diffusione che, come noto, è fortemente influenzato dalla presenza di difetti).

L'annealing termico rapido può essere

adiabatico: tempo di riscaldamento molto breve ($< 10^{-7}$ s); la superficie del film fonde e ricristallizza. La diffusione dei droganti in fase liquida è così rapida che il profilo di impiantazione non può essere conservato. Questo tipo di annealing può essere utilizzato nell'integrazione tridimensionale (figura 9).

a flusso termico: i tempi di riscaldamento sono compresi tra 10^{-7} s ed 1 s. Non si ha fusione del silicio e nemmeno diffusione di droganti. Si può usare un fascio elettronico, un laser, una lampada alogena. Talvolta il rapido raffreddamento crea dei difetti (precipitati di impurezze).

5.3.3 Impianto attraverso uno strato amorfo

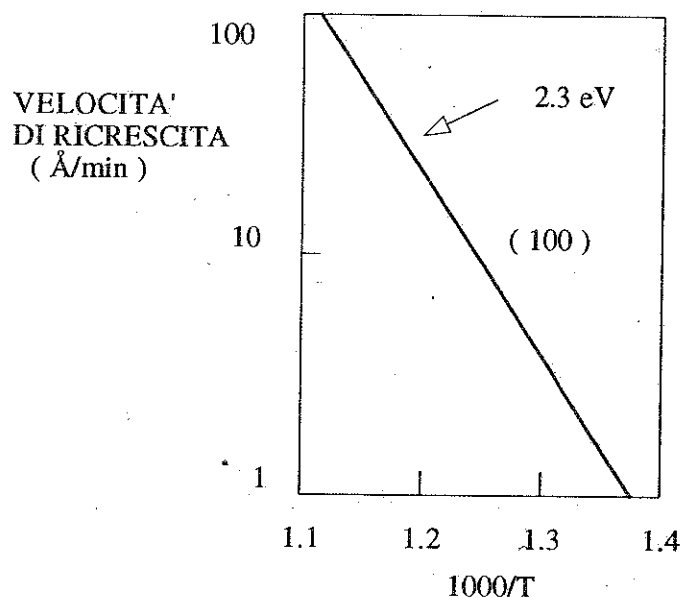
Si tratta di un metodo utilizzato per consentire un'implantazione random ma anche perché uno strato di ossido consente di effettuare la ricottura minimizzando le fughe di drogante verso l'atmosfera ed inoltre di posizionare il picco del profilo di concentrazione vicino alla superficie del semiconduttore.

Per determinare il profilo di concentrazione si procede (vedi figura 10)

1. determinando il profilo come se l'implanto avvenisse nell'ossido;
 2. determinando il profilo come se l'implanto avvenisse nel semiconduttore privo di strato superficiale di ossido;
- (notare che per calcolare i profili di cui ai punti (1) e (2) è necessario conoscere R_p e ΔR_p sia per l'ossido che per il semiconduttore)

1) Silicio completamente amorfizzato

La ricrescita avviene per epitassia in fase solida.



2) Silicio con alta concentrazione di difetti

La riparazione dei difetti richiede una energia di attivazione di 5 eV. e temperature dell'ordine di 1100 K.

IL RISULTATO DI UN ANNEALING INCOMPLETO E' UNA RIDUZIONE DEL DROGAGGIO EFFETTIVO.

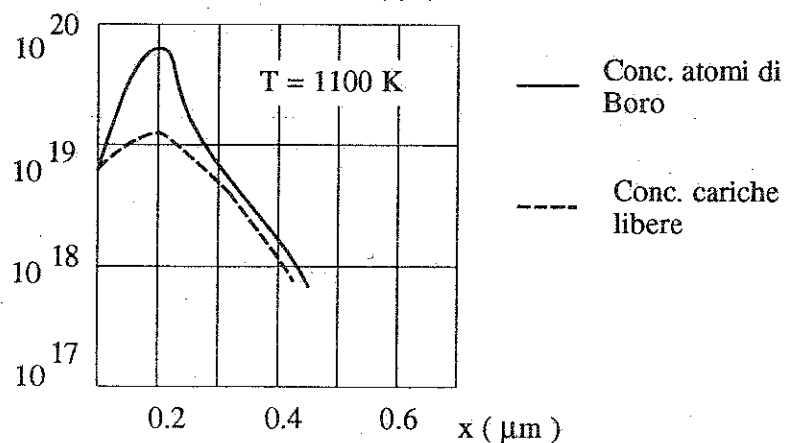


Figura 5.8: Annealing per il recupero del danno da impianto.

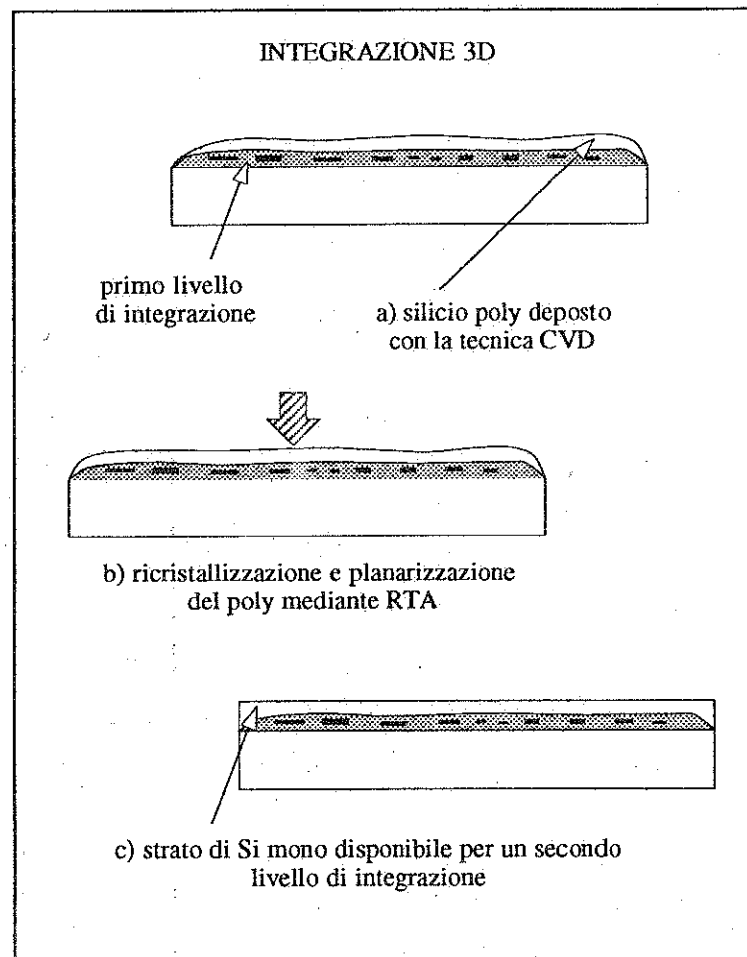


Figura 5.9: Annealing termico rapido ed integrazione tridimensionale.

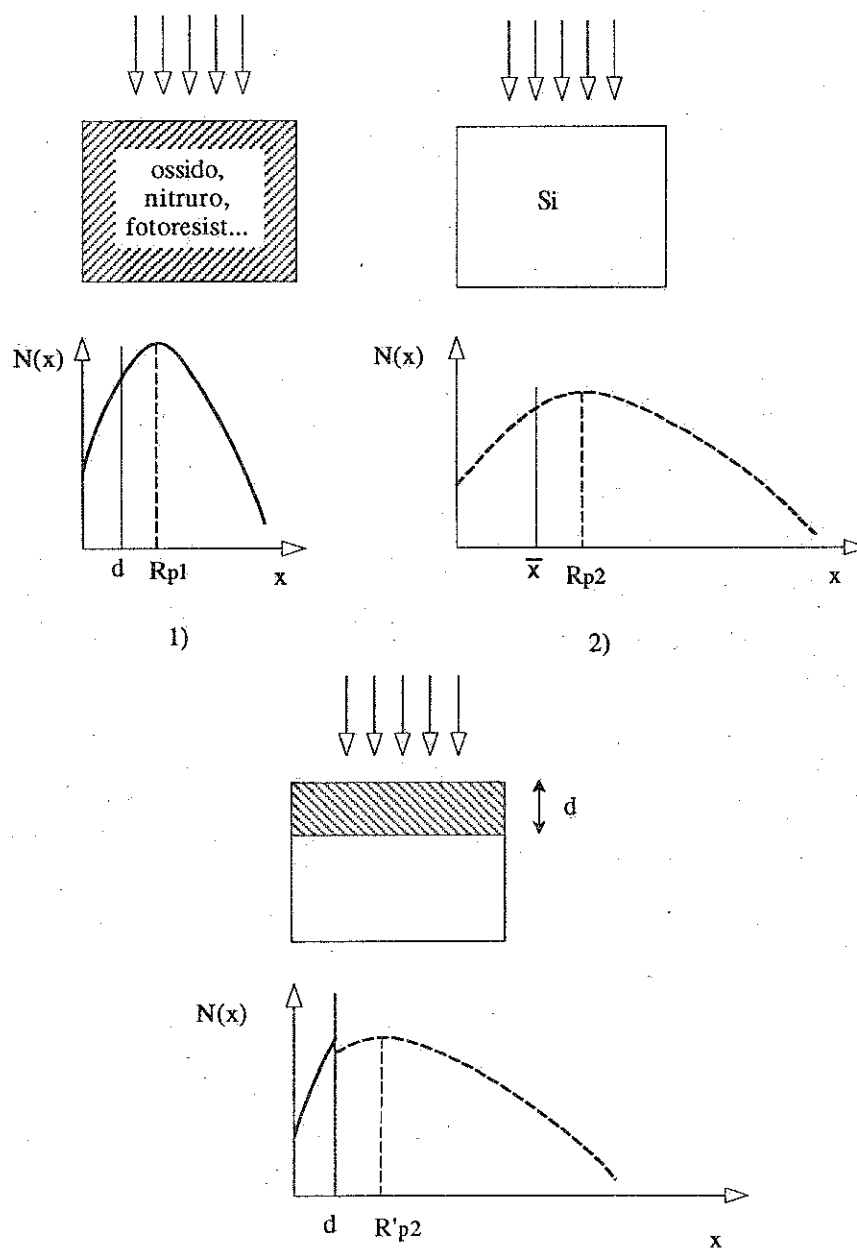


Figura 5.10: Impianto attraverso uno strato amorfo; calcolo del profilo risultante.

3. il profilo (1) e lo spessore dello strato di ossido d determinano la quantità di drogante impiantata effettivamente nell'ossido; (si tratta dell'area sottesa dal profilo per ascisse minori di d).

Naturalmente l'area complementare costituirà una misura della quantità di drogante impiantata nel semiconduttore.

4. la retta verticale $x = \bar{x}$ dividerà il profilo (2) secondo le aree di cui al punto (3).
5. le porzioni reali saranno allora quella nell'ossido per $x < d$ e quella nel silicio per $x > \bar{x}$.

Il profilo risultante si ottiene traslando il profilo del silicio di una quantità $\bar{x} - d$ così che il massimo del profilo nel semiconduttore si avrà per $R'_{p_2} = R_p - (\bar{x} - d)$ (il pedice 2 indica il semiconduttore mentre 1 indicherà parametri relativi all'ossido).

Calcolo di R'_{p_2}

Basta imporre l'uguaglianza di una coppia di aree; per esempio:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^d \frac{N_{\diamond}}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_{p_1}} \exp - \left(\frac{x - R_{p_1}}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{p_1}} \right)^2 dx = \\ = \int_{-\infty}^{\bar{x}} \frac{N_{\diamond}}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_{p_2}} \exp - \left(\frac{x - R_{p_2}}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{p_2}} \right)^2 dx \end{aligned}$$

con il cambiamento di variabile:

$$\left(\frac{x - R_{p_2}}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{p_2}} \right) = t$$

si ha:

$$\int_{-\infty}^{\frac{d - R_{p_1}}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{p_1}}} e^{-t^2} dt = \int_{-\infty}^{\frac{\bar{x} - R_{p_2}}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{p_2}}} e^{-t^2} dt$$

da cui:

$$\int_{\frac{\bar{x} - R_{p_2}}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{p_2}}}^{\frac{d - R_{p_1}}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{p_1}}} e^{-t^2} dt = 0$$

risolvendo:

$$R_{p_2} = \bar{x} - (d - R_{p_1}) \frac{\Delta R_{p_2}}{\Delta R_{p_1}}$$

e quindi:

$$R'_{p_2} = R_{p_2} - (\bar{x} - d) = d - (d - R_{p_1}) \frac{\Delta R_{p_2}}{\Delta R_{p_1}}$$

Notare che si poteva ricavare anche \bar{x} ottenendo:

$$\bar{x} = R_{p_2} + (d - R_{p_1}) \frac{\Delta R_{p_2}}{\Delta R_{p_1}}$$

5.4 Valutazione degli strati impiantati e diffusi

5.4.1 Resistenza di strato

Definiamo adesso per un film conduttore (o semiconduttore) la resistenza di strato ρ_{\square} .

Consideriamo un parallelepipedo del materiale in oggetto di lunghezza ℓ , larghezza w e spessore x_i . La resistenza R , in direzione parallela ad ℓ , ha la consueta espressione

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

dove ρ è la resistività del materiale. Nel caso in cui il materiale sia un semiconduttore drogato in direzione x (si ricordi che il profilo di drogaggio non è in generale costante con x) l'espressione precedente, che presuppone una ρ costante , non può essere evidentemente usata. Scriveremo allora

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

dove $\bar{\rho} = 1/\bar{\sigma}$ rappresenta la resistività media dello strato e $\bar{\sigma}$ è definita dalla relazione

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

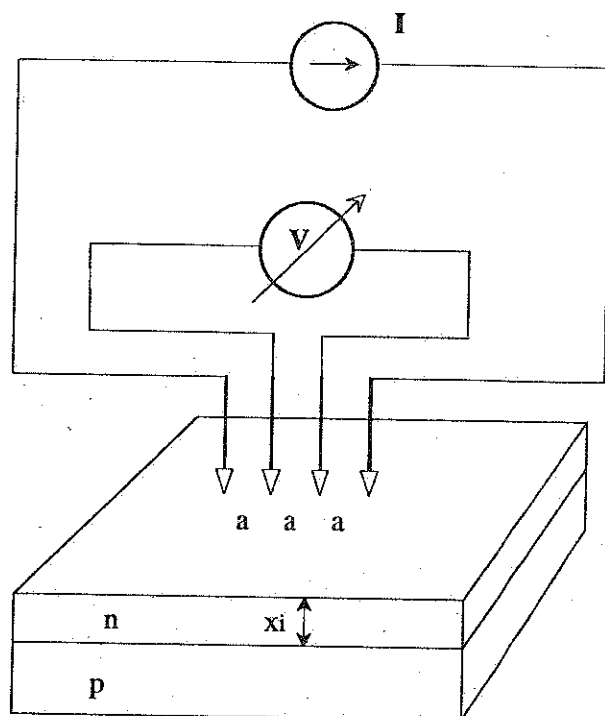


Figura 5.11: Schema del metodo di misura della resistività con le quattro punte.

dove sia μ_n che n dipendono da x . Avremo quindi

$$R = \rho_{\square} \cdot \frac{\ell}{w}$$

dove ρ_{\square} è la resistenza di strato e rappresenta la resistenza di un quadrato di lato w (indipendentemente da w). Se è quindi possibile misurare ρ_{\square} , per conoscere il valore della resistenza di una interconnessione di geometria assegnata basta sapere di quanti quadrati essa è costituita.

Con riferimento alla figura 11, che descrive schematicamente il metodo delle quattro punte, si può dimostrare che

$$V = \frac{I\bar{\rho}}{\pi x_i} \ln(2) = 0.22 \frac{I}{x_i} \bar{\rho}$$

e quindi

$$\rho_{\square} = 4.532 \frac{V}{I}$$

nel caso che $x_i \ll a$. In generale l'espressione precedente deve essere corretta con un fattore moltiplicativo \mathcal{F} che tiene conto della geometria dello strato da misurare. Avremo

$$\rho_{\square} = \mathcal{F} \frac{V}{I}$$

alcuni valori di \mathcal{F} sono riportati nella tabella seguente.

d/a	cerchio ○	quadrato □	rettangolo □□	rettangolo □□□
3.0	2.2662	2.4575	2.7000	2.7005
5.0	3.3625	3.5098	3.5749	3.5750
10.0	4.1716	4.2209	4.2357	4.2357
20.0	4.4364	4.4516	4.4553	4.4553
40.0	4.5076	4.5120	4.5129	4.5129

Si presenta il problema di controllare il risultato di una diffusione o di una impiantazione.

Sia dunque il profilo di drogaggio da valutare $N_D = N_D(x)$ per $x \in (0, x_i)$. Avremo per la resistenza di strato fra le ascisse X ed x_i :

$$\begin{aligned} \rho_{\square}(X) &= \frac{\bar{\rho}}{x_i - X} = \frac{1}{\bar{\sigma}(x_i - X)} = \\ &= \frac{1}{\int_X^{x_i} qn(x) \mu_n(x) dx} \end{aligned}$$

e per quella relativa allo strato compreso fra le ascisse $X + \Delta$ ed x_i

$$\rho_{\square}(X + \Delta) = \frac{1}{\int_{X+\Delta}^{x_i} qn(x) \mu_n(x) dx}$$

Invertendo le espressioni precedenti, sottraendo e nell'ipotesi che Δ sia sufficientemente piccolo da poter considerare il drogaggio come costante fra X e $X + \Delta$ otteniamo

$$\frac{1}{\rho_{\square}(X)} - \frac{1}{\rho_{\square}(X + \Delta)} = \int_X^{X+\Delta} qn(x)\mu_n(x) dx \simeq$$

$$\simeq qN_D(X)\mu_n(X)\Delta$$

$$N_D(X) = \frac{\frac{1}{\rho_{\square}(X)} - \frac{1}{\rho_{\square}(X+\Delta)}}{q\mu_n(X)\Delta}$$

Nell'espressione precedente $\mu_n = \mu_n[N_D(x)]$ per cui è necessario un procedimento iterativo per risalire al valore del drogaggio in X .

Come abbiamo visto $\rho_{\square}(x)$ si può misurare con il metodo delle quattro punte, se è nota x , che rappresenta lo spessore dello strato ovvero la profondità di giunzione.

5.4.2 Misura della profondità di giunzione

Implica una lavorazione meccanica del wafer diffuso, un attacco chimico "colorante", una misura di tipo ottico.

Metodo interferometrico

Dopo aver lappato la fetta a basso angolo ($1^\circ \div 3^\circ$) in modo da amplificare la zona di giunzione, la si immerge in una soluzione (*attacco staining*: $HF + CuSO_4$) che ha la proprietà di depositare il rame selettivamente sulla zona n . La regione di giunzione viene così evidenziata dalla diversa colorazione. Illuminando il wafer con luce monocromatica (fig. 12) attraverso uno specchio semiriflettente è facile convincersi che se in corrispondenza della zona piatta del wafer, le onde e.m. riflesse dal wafer stesso e dallo specchio si sommano in controfase (minimo di intensità), questa circostanza si ripeterà, in corrispondenza della zona lappata, ogni volta che x è uguale ad un multiplo intero di $\lambda/2$ (λ è la lunghezza d'onda della luce illuminante).

In questo caso infatti, l'onda riflessa dal wafer subisce uno sfasamento aggiuntivo di 2π . Il numero (N) di frange scure fornisce un

valore di profondità ($N\lambda/2$) in termini di lunghezza d'onda della luce incidente. La giunzione, (linea tratteggiata in figura), come già detto, viene localizzata tra le frange grazie alla diversa colorazione.

Metodo groove and stain

Si tratta di scavare (to groove) il wafer come mostrato nella figura 13. L'immersione nella soluzione staining consente di riconoscere e misurare le distanze W_1 e W_2 da cui

$$x_i = A_2 - A_1$$

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

Resta il problema di sezionare il wafer in direzione ortogonale ad x in modo che Δ sia piccolo e noto con precisione. La tecnica consiste nell'ossidare il wafer e quindi rimuovere l'ossido con un attacco selettivo. Poiché la crescita di ossidi sottili mediante ossidazione termica risulta troppo laboriosa per questo scopo (si tratta in definitiva di crescere un ossido sottile sacrificale con l'intento di consumare un po' di silicio) e inoltre altererebbe il profilo di drogaggio, si ricorre alla più semplice ossidazione anodica che è descritta nella figura 12. La tecnica consente di crescere in modo riproducibile spessori di ossido dell'ordine del centinaio di Å e quindi di asportare ogni volta un Δ di silicio dell'ordine di 50 Å.

I punti sperimentali del profilo di drogaggio (vedi figura 14) sono quindi relativi ad ascisse che distano al minimo una dall'altra di questa quantità. Si noti che l'ossidazione anodica è un processo a temperatura ambiente e quindi lascia inalterato il profilo di drogaggio. La tecnica descritta presuppone che tutti gli atomi droganti siano diventati elettricamente attivi.

Altre tecniche per il rilievo di $N(x)$ sono descritte nel paragrafo sui contatti Schottky (misure $C - V$) e nella parte sulle tecniche di analisi.

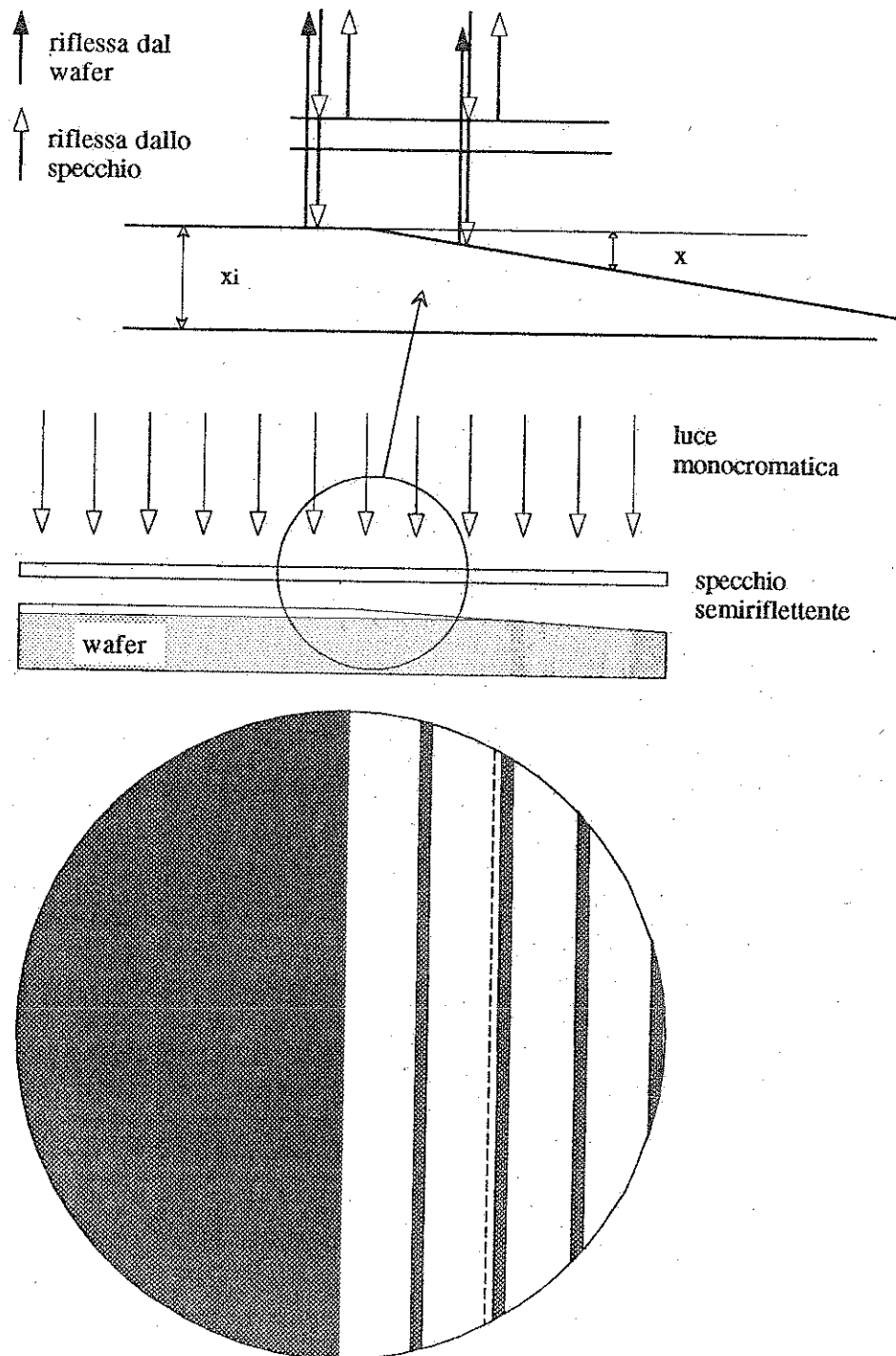


Figura 5.12: Metodo interferometrico per la misura della profondità di giunzione.

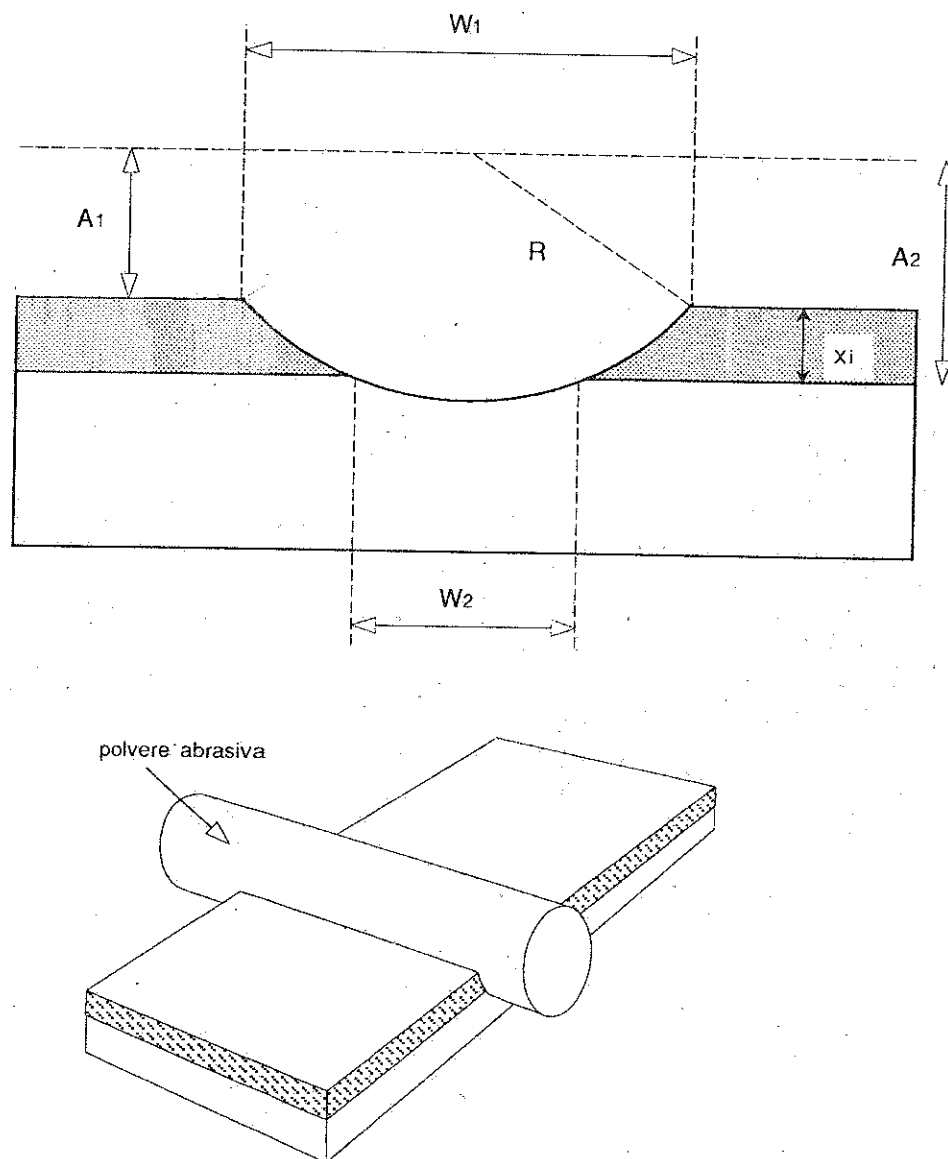


Figura 5.13: Metodo groove and stain per la misura della profondità di giunzione.

Figura 5.14: Descrizione del metodo per la determinazione del profilo di drogaggio.

