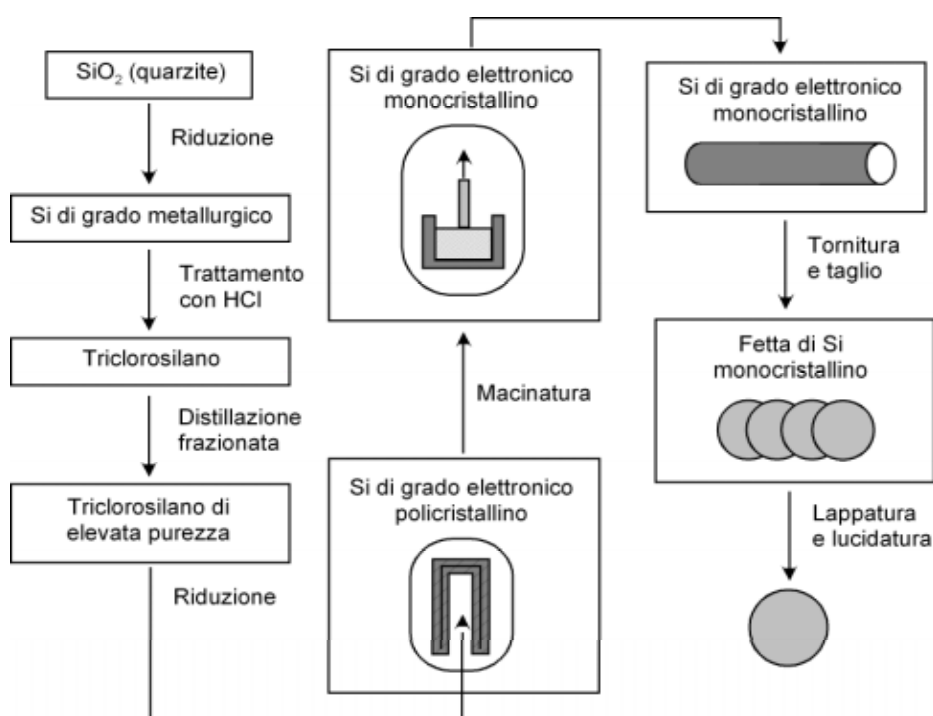


Dispositivi e Tecnologie Elettroniche

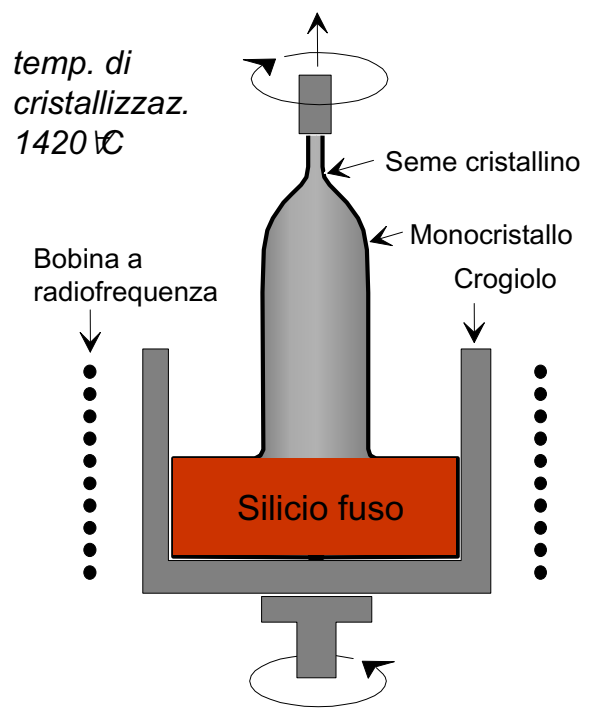
Tecnologia

Produzione di fette (wafer) di Si

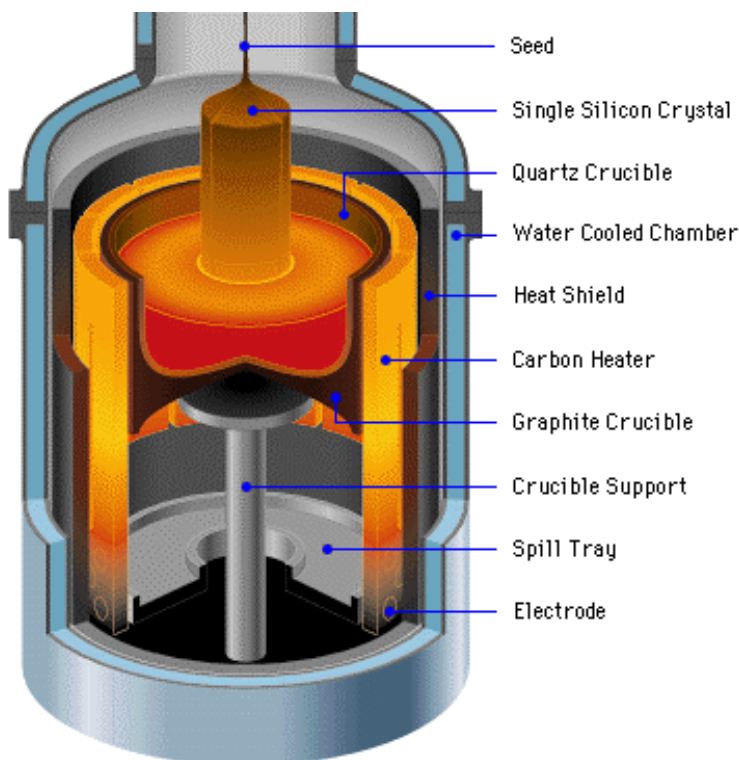


Crescita Czochralski

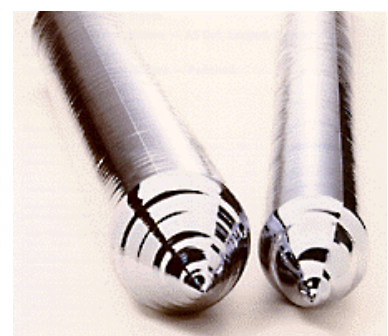
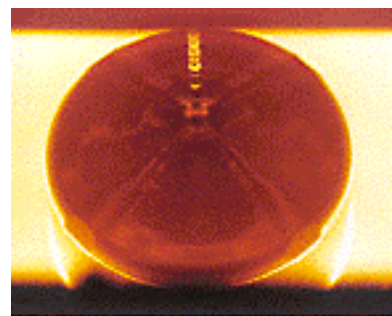
- *Fusione nel crogiolo del policristallo per induzione*
- *Aggiunta drogante (B per pSi; P od As per nSi)*
- *Accrescimento controllato del seme (preorientato) per formare il monocristallo*
- *Prodotto: barra monocristallo di 6, 10 pollici (15, 25 cm) di diametro, circa 100 cm di lunghezza (limitato dal peso)*
- *Crogiolo: grafite rivestita in quarzo SiO₂*



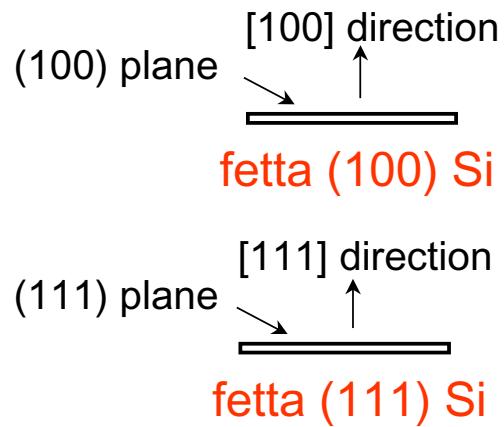
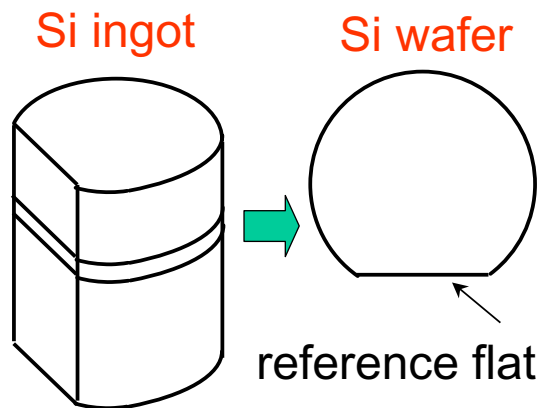
Crescita Czochralski



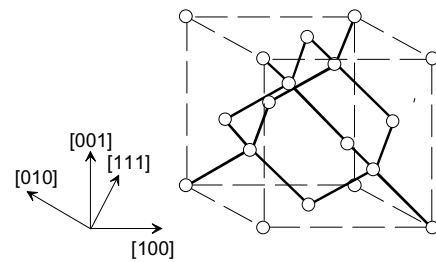
Vista superiore



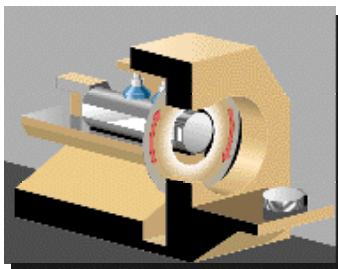
Dal cristallo alla fetta (wafer)



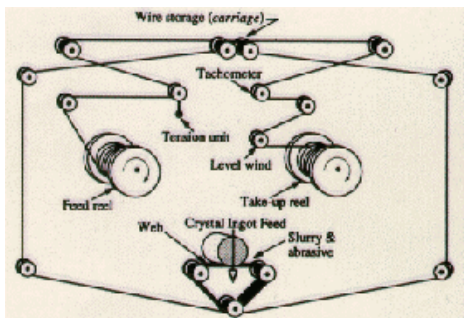
- *Notazione degli Indici di Miller per indicare le direzioni in un cristallo: [111] indica una famiglia di piani parallele al piano che intercetta i tre assi nel punto a, a passo reticolare; [100] la famiglia parallela al piano ortogonale all'asse x, [010] all'asse y, [001] a z.*



Dal cristallo alla fetta (wafer)



- *Taglio con sega circolare*

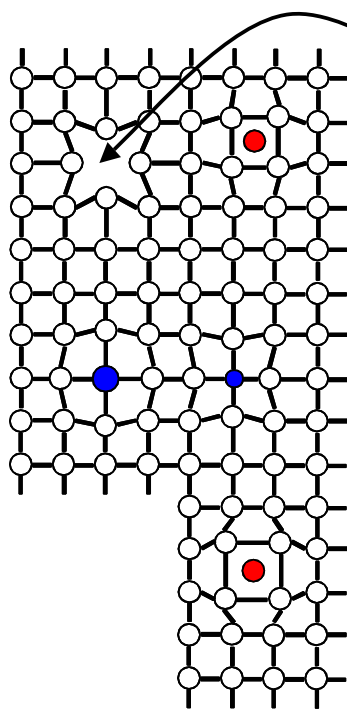


- *Taglio a filo*

Wafer da 300 mm



Difetti cristallini



■ Difetti puntuali:

■ Vacanze

■ Sostituzionali

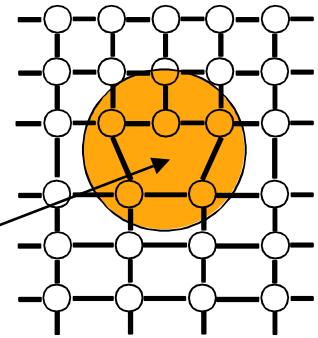
■ Interstiziali

■ Difetti di linea:

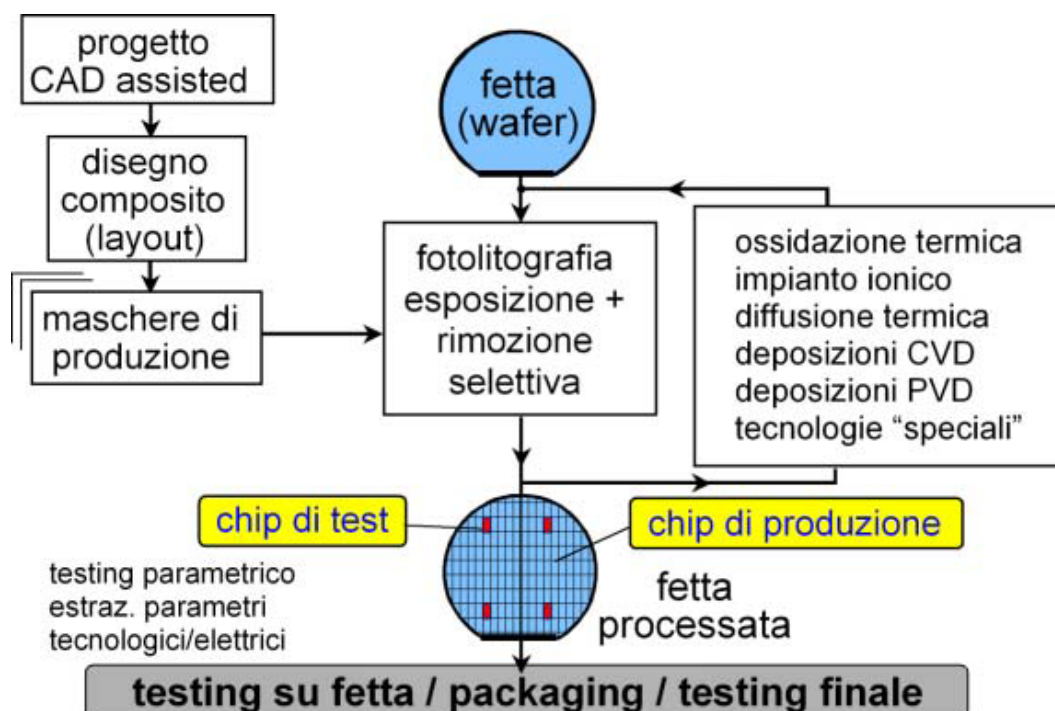
■ Dislocazioni

■ Difetti di volume:

■ Precipitati



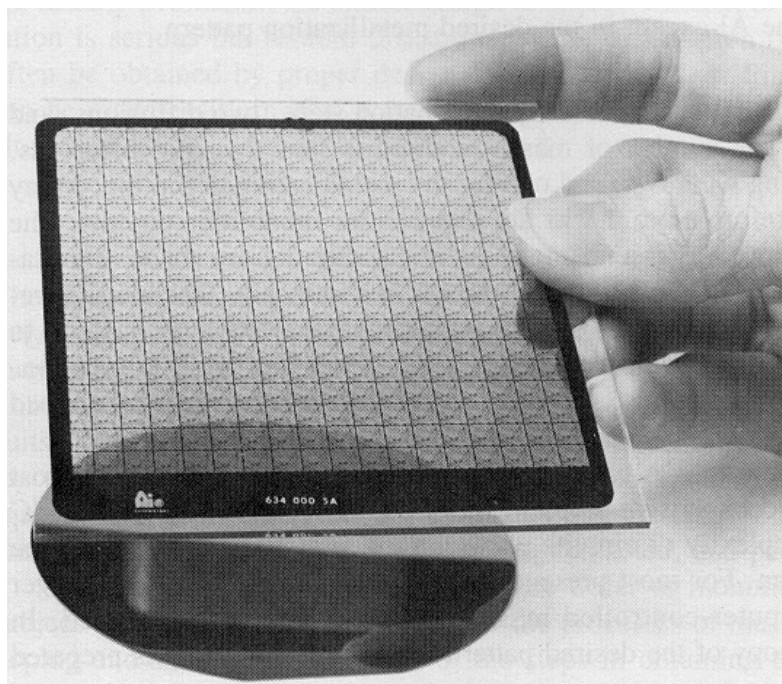
Tecnologia planare del Si



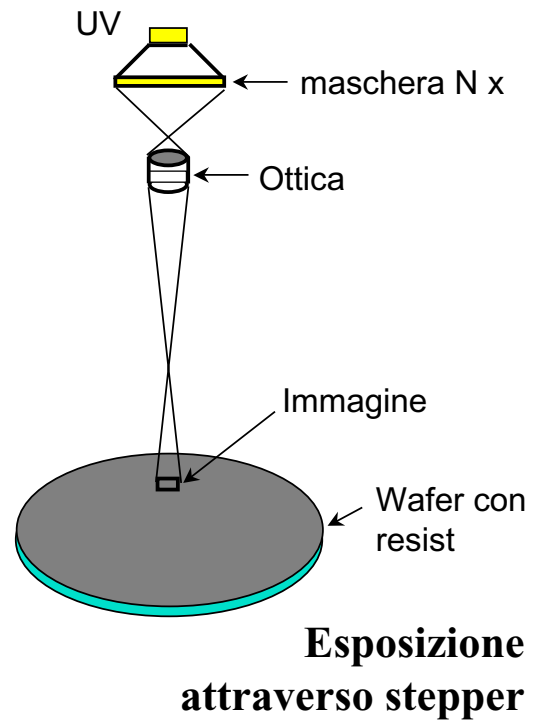
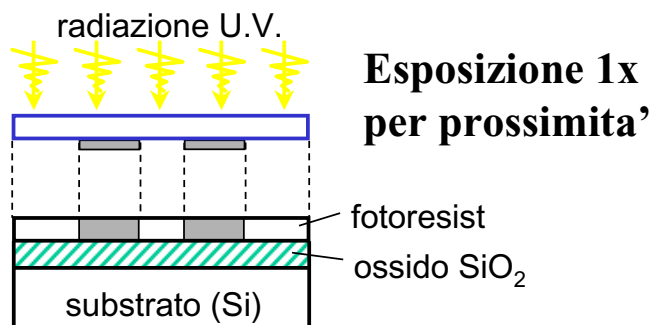
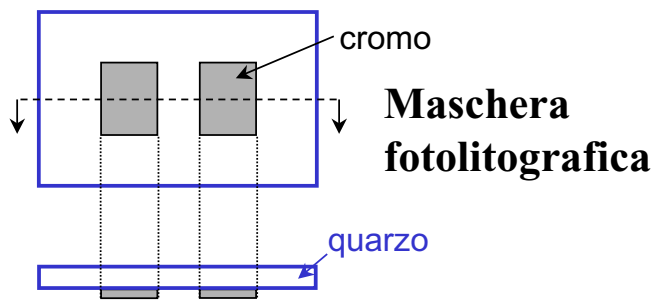
Fotolitografia

- *Tecnica per formare “microstrutture” su film sottili depositati (es. metallo) od accresciuti (es. SiO_2) sul substrato semiconduttore:*
 - deposizione resist chimicamente fotosensibile
 - esposizione fotoresist (attraverso maschera)
 - sviluppo fotoresist resist “esposto”
 - attacco chimico selettivo (etching)
- *Operando in sequenza con maschere fra loro “allineate” si realizza il Circuito Integrato*

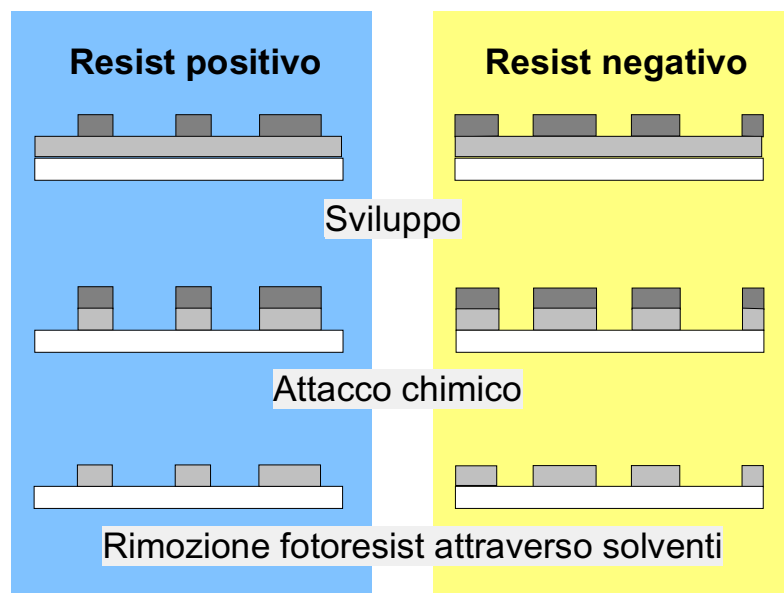
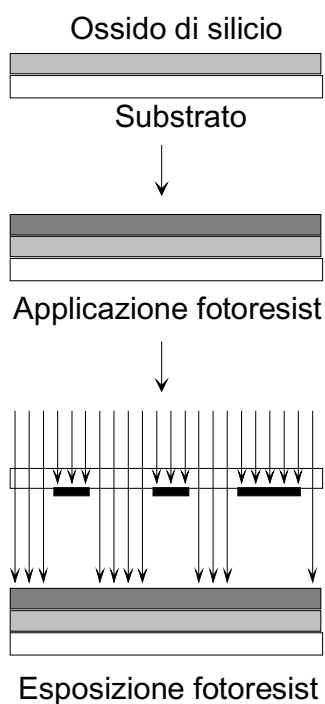
Wafer e maschera N x



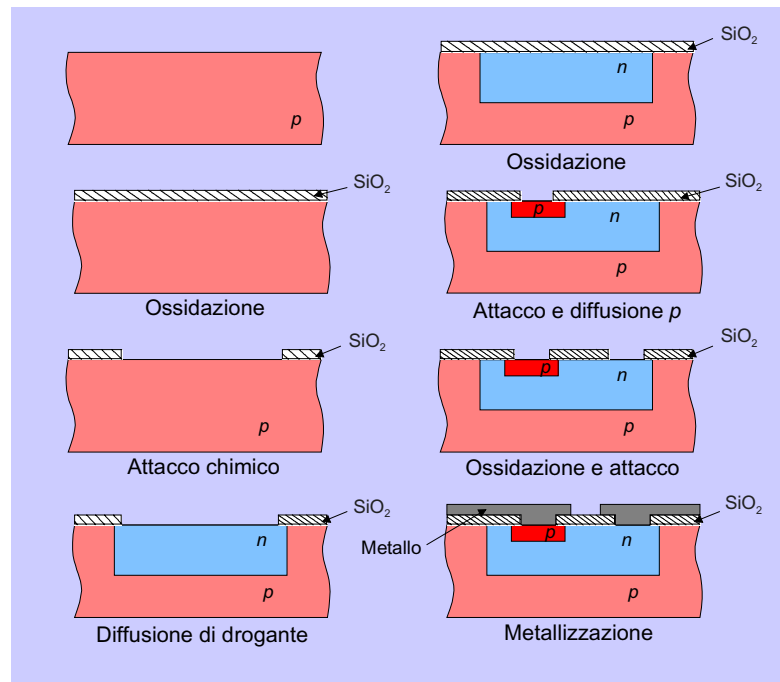
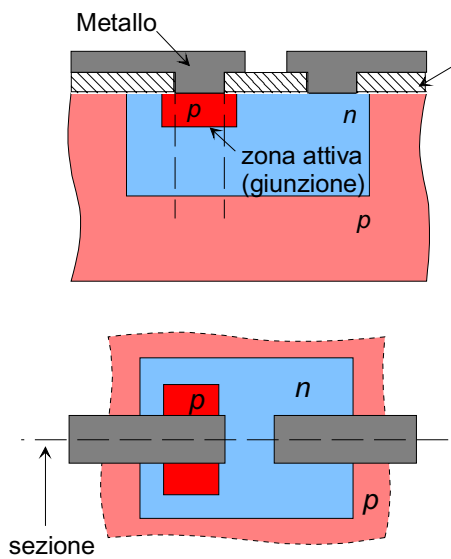
Esposizione UV



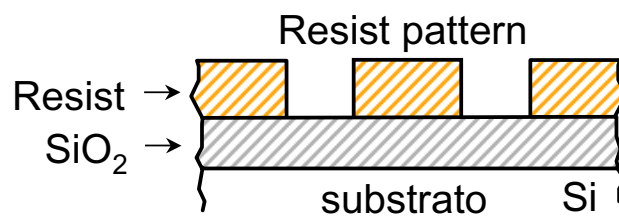
Resist positivo e negativo



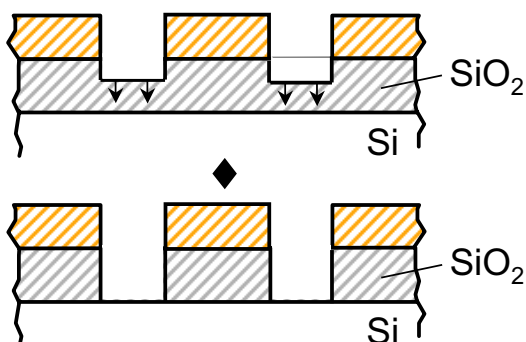
Esempio: diodo *pn* integrato



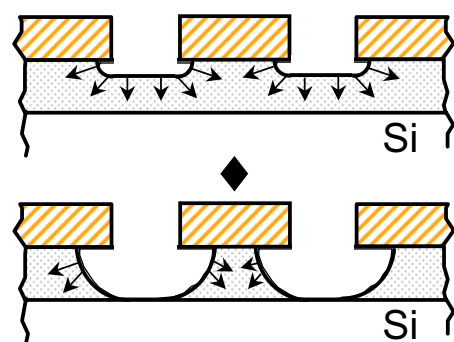
Attacco chimico



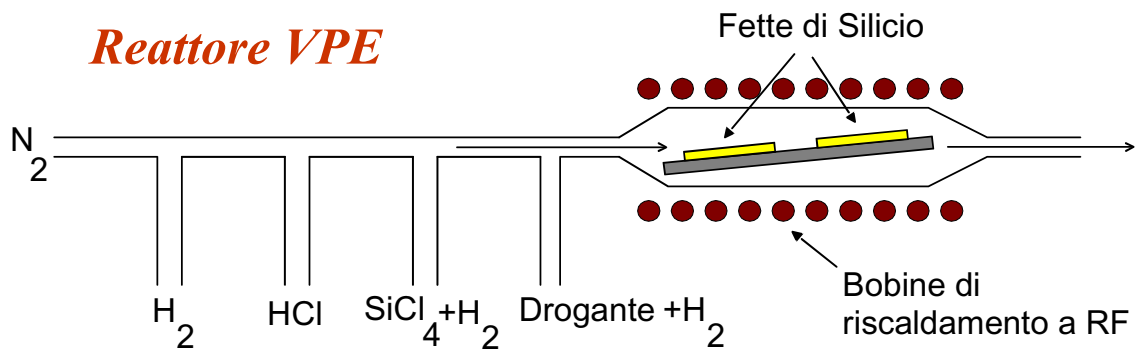
**Attacco per via secca
(RIE, anisotropo)**



**Attacco per via umida
(HF, isotropo)**



Crescita epitassiale



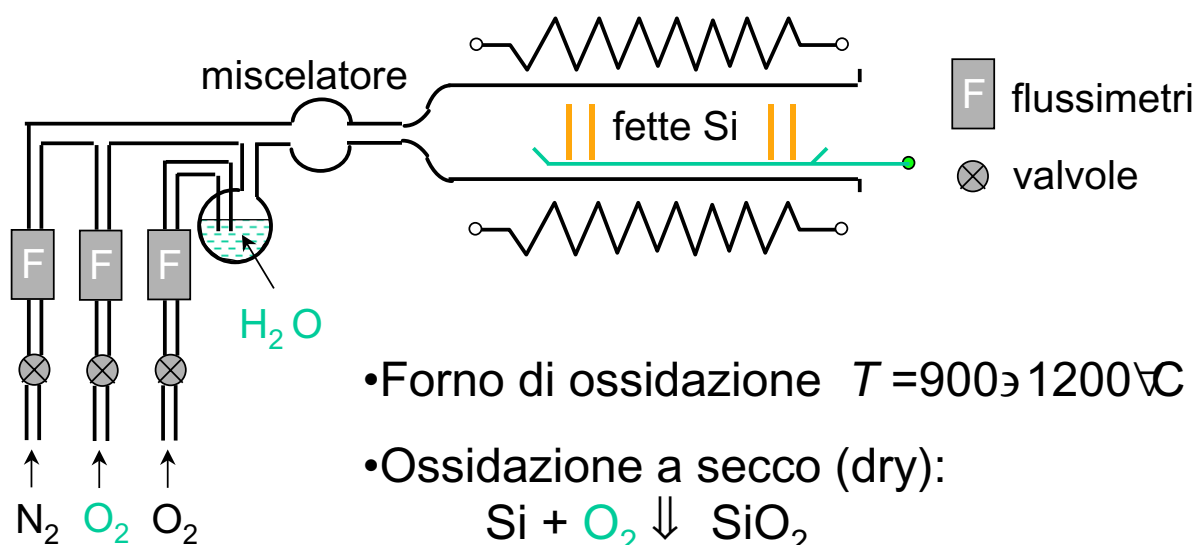
■ *Crescita di semiconduttore monocristallino (intrinseco o drogato) su substrato*

- Dell stesso semiconduttore: omoepitassia
- Di semiconduttore diverso (eteroepitassia)

■ *Epitassia da fase vapore (VPE), liquida (LPE)*

■ *Tecniche avanzate: epitassia da fasci molecolari (MBE), MOCVD (crescita semiconduttori composti)*

Ossidazione



• Forno di ossidazione $T = 900 \div 1200 \text{ } ^\circ\text{C}$

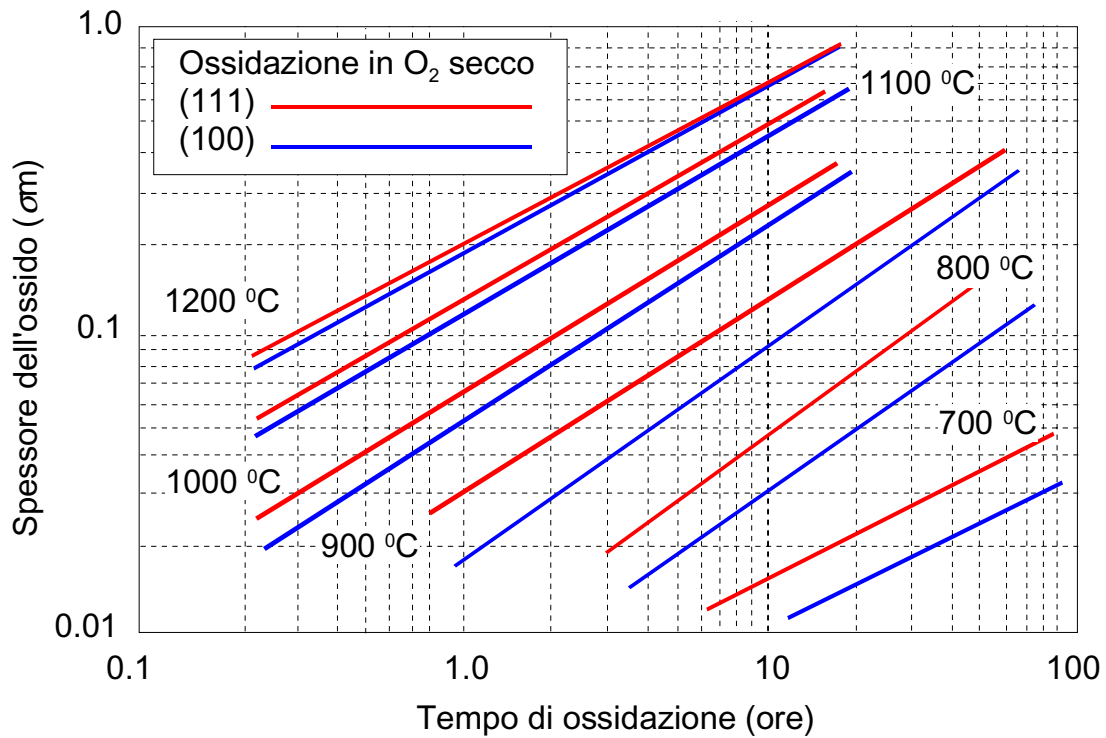
• Ossidazione a secco (dry):



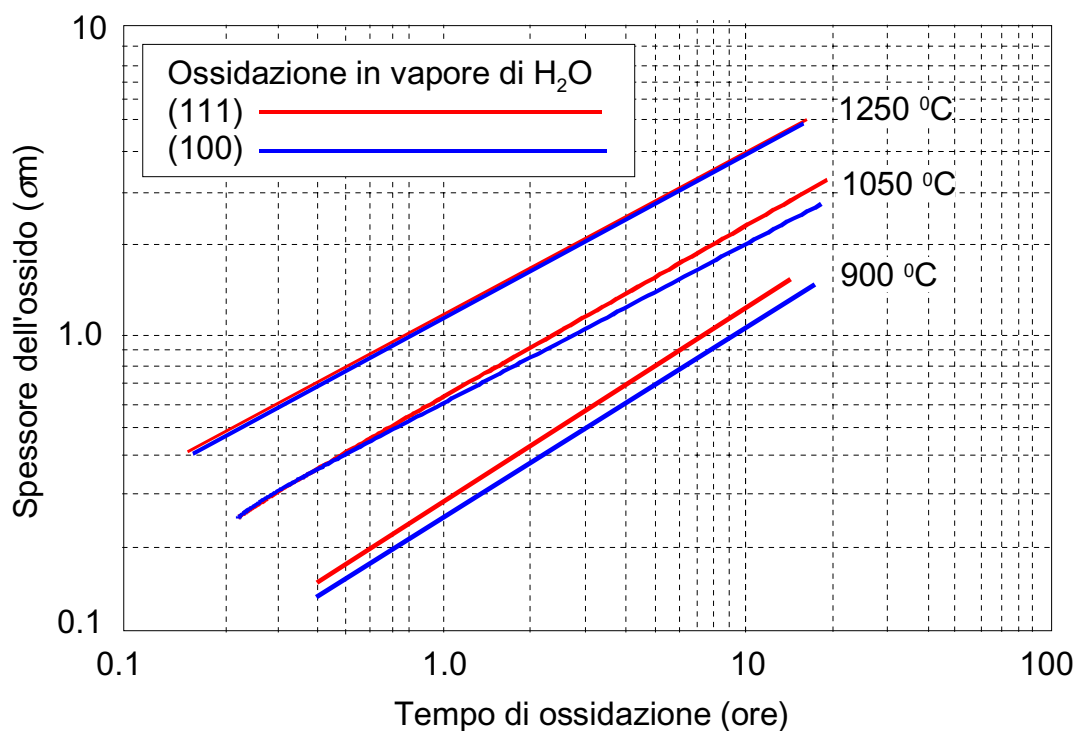
• Ossidazione da vapore acqueo (wet):



Ossidazione in ossigeno



Ossidazione in vapor d'acqua



Legge di crescita spessore $x_0(t)$

■ Legge generale di crescita:

$$x_0(t) = \frac{A}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4t\vartheta}{A^2/4B}} - 1 \right)$$

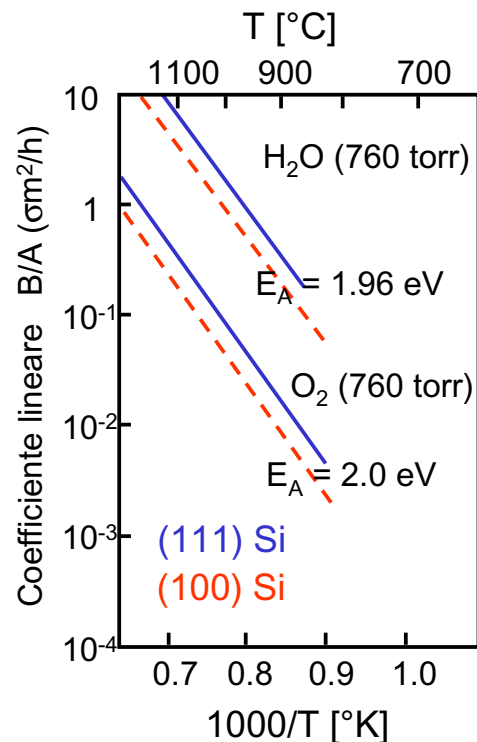
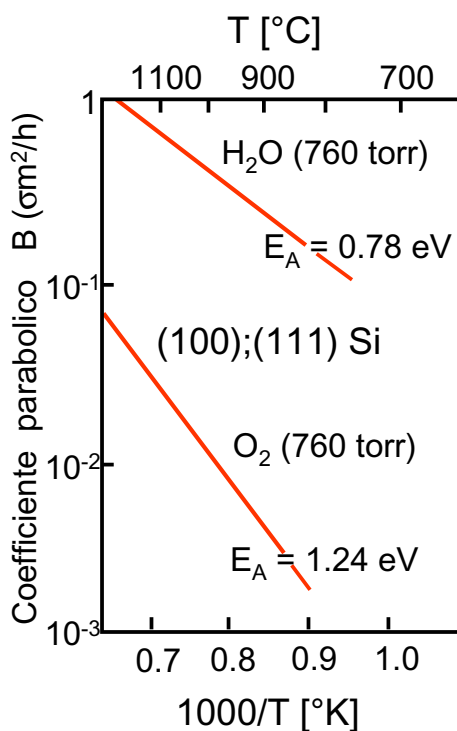
■ Approx. parabolica (cinetica controllata dalla diffusione, tempi lunghi e ossidi spessi):

$$\frac{4t\vartheta}{A^2/4B} \gg 1 \quad \heartsuit \quad x_0 \approx \sqrt{B} \sqrt{4t\vartheta}$$

■ Approx. lineare (cinetica controllata dalla reazione, tempi brevi e ossidi sottili):

$$\frac{4t\vartheta}{A^2/4B} \ll 1 \quad \heartsuit \quad x_0 \approx A \sqrt{t\vartheta}$$

Parametri A e B

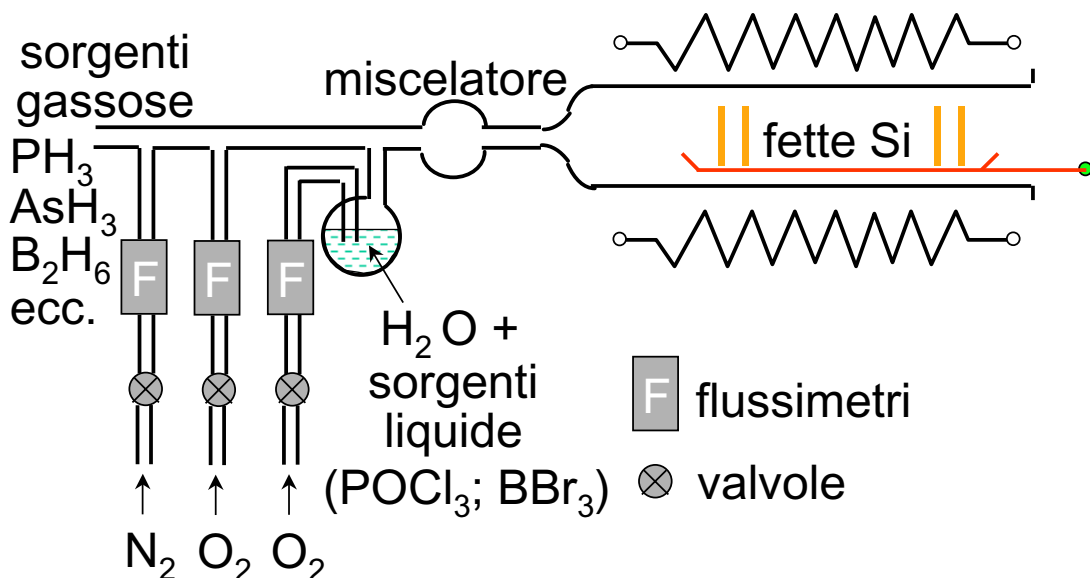


Tecniche di drogaggio

- **Diffusione:** gli atomi droganti sono portati alla superficie della fetta per deposizione chimica, ad alta temperatura (ad es. 900-1000 °C) gli atomi diffondono nel substrato.
 - Profilo monotono decrescente, poco flessibile e controllabile
 - Trattamento ad alta temperatura, potenzialmente distruttivo
- **Impiantazione:** droganti immessi nel substrato come proiettili ad alta energia.
 - Profilo flessibile e molto ben controllabile
 - Trattamento a temperatura intermedia

Diffusione

- **Forno di diffusione (900-1000 °C)**



Diffusione da sorgente infinita

- *Ipotesi: concentrazione superficiale costante*

$$C(0, t) = C_s$$

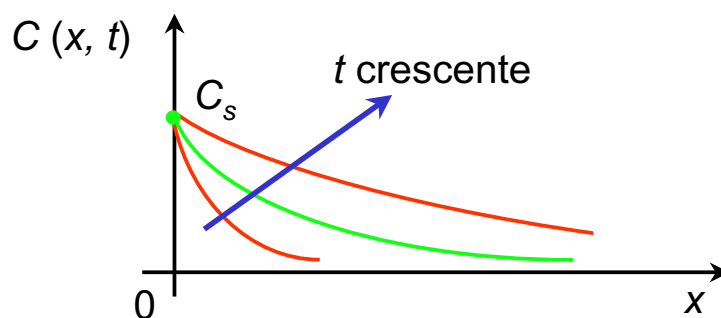
- *Condizioni al contorno: $C(0, t) = C_s, C(\infty, t) = 0$*

- *Condizione iniziale: $C(x, 0) = 0$*

- *Utilizzata per la predeposizione di drogante in uno strato superficiale; la concentrazione superficiale e' limitata dalla solubilita' solida del drogante. Il profilo finale e' ottenuto per diffusione a dose costante (drive-in)*

Profilo di drogaggio (predep.)

$$C(x, t) = C_s \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad \left. \begin{array}{l} 2\sqrt{Dt} \text{ Lunghezza di} \\ \text{diffusione} \end{array} \right\}$$



$$S = \int_0^{\infty} C_s \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) dx = \frac{2\sqrt{Dt}}{\sqrt{\phi}} C_s \quad \text{Dose totale predeposta, cm}^{-2}$$

Funzione complementare di errore

Funzione definita da:

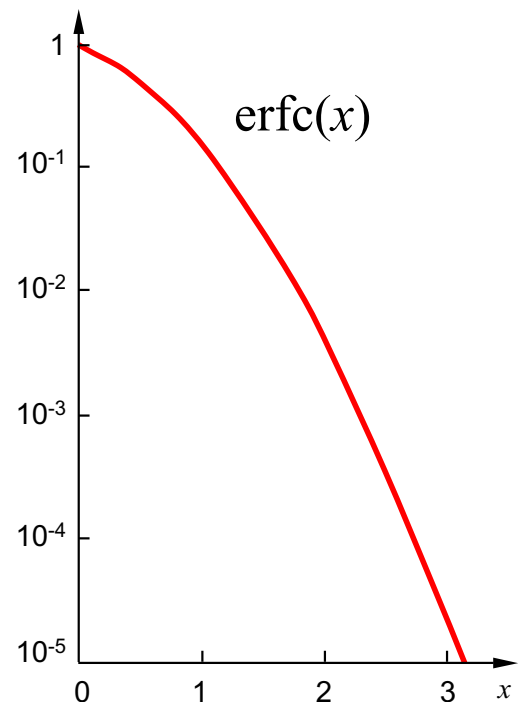
$$\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\phi}} \int_x^{\infty} \exp(-v^2) dv$$

Approssimazione numerica:

$$\text{erfc}(x) \approx 1 - 0.3480242 z^2$$

$$+ 0.095879 z^4 - 0.7478556 z^6 + 0.17898768 z^8 - 0.04240337 z^{10} + 0.00531975 z^{12} - 0.00019081 z^{14} + 0.00000344 z^{16} - 0.00000039 z^{18} + 0.00000003 z^{20}$$

$$z = \frac{1}{1 + 0.47047 x}$$



Diffusione a dose S costante

Dose totale costante:

$$S = \int_0^{\infty} C(x, t) dx = \text{cost.}$$

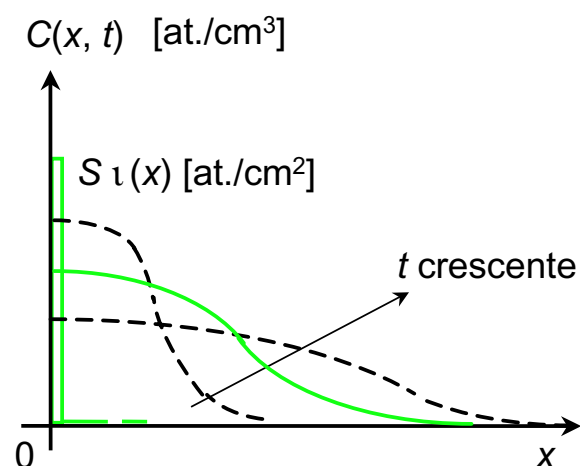
Soluzione (da una distribuzione iniziale impulsiva con dose S):

$$C(x, t) = \frac{S}{\sqrt{\phi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

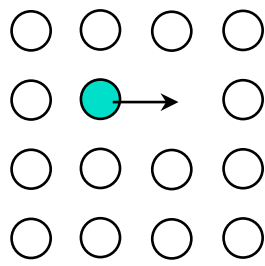
Concentrazione superficiale:

$$C(0, t) = \frac{S}{\sqrt{\phi Dt}}$$

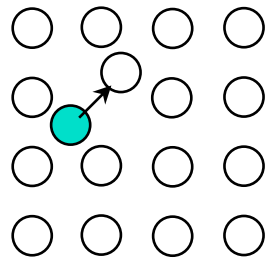
Utilizzata per realizzare un profilo di drogaggio controllato (postdiffusione o drive-in)



Meccanismi di diffusione

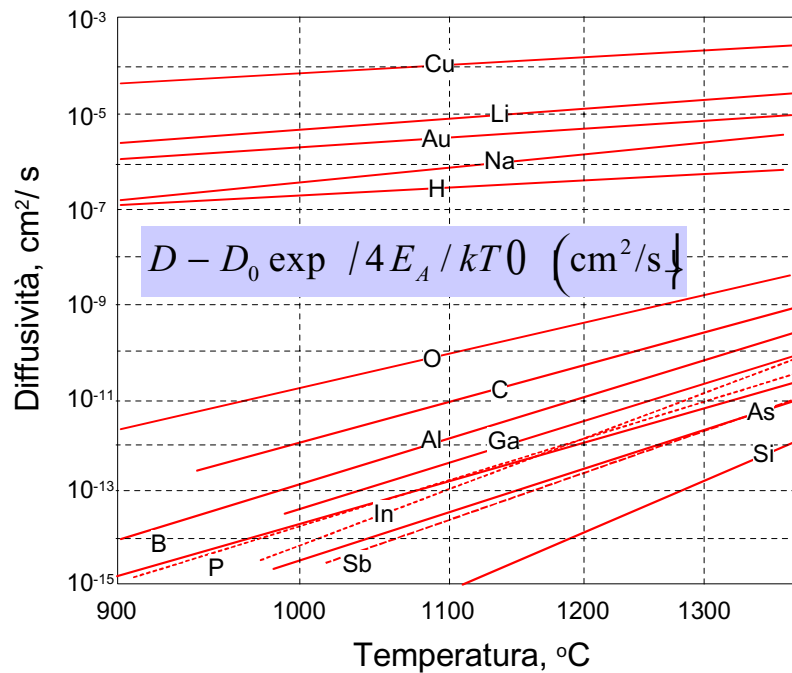


per vacanze



per interstiziali

■ *La diffusivita' aumenta con la temperatura*



Dispositivi Elettronici — Tecnologia

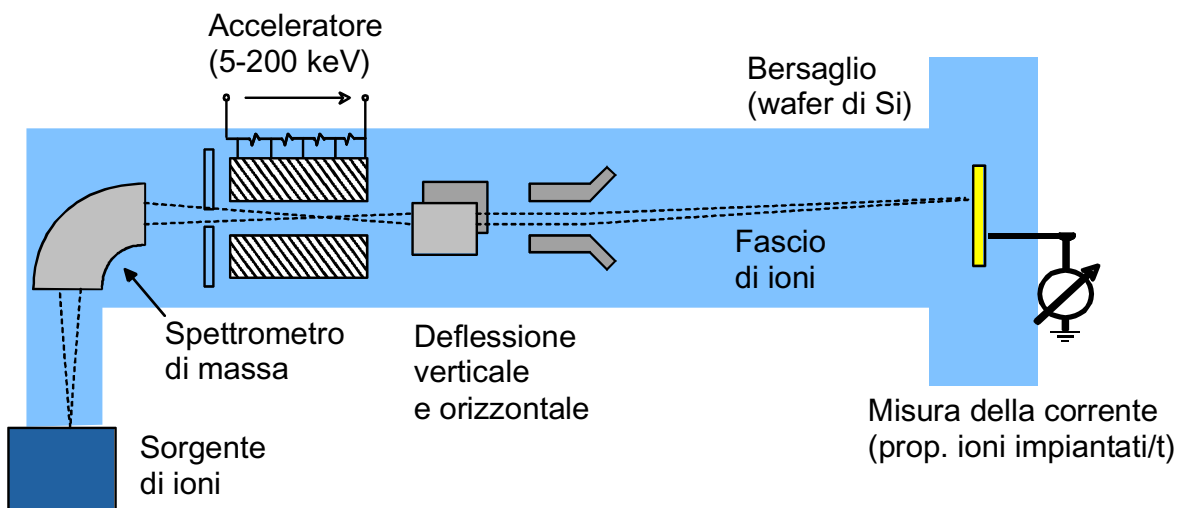
27

Impiantazione ionica

■ *Fascio di atomi droganti ad alta energia impiantati nel bersaglio (zone non drogate protette da ossido o altre maschere)*

■ *Controllo accurato della dose impiantata*

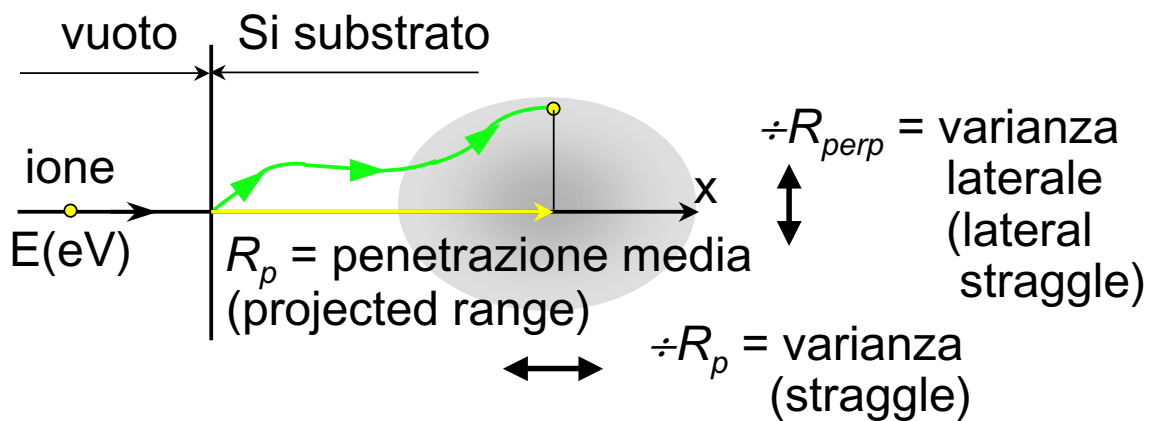
■ *Profili non monotoni e di profondita' controllata variando l'energia di impianto*



Dispositivi Elettronici — Tecnologia

28

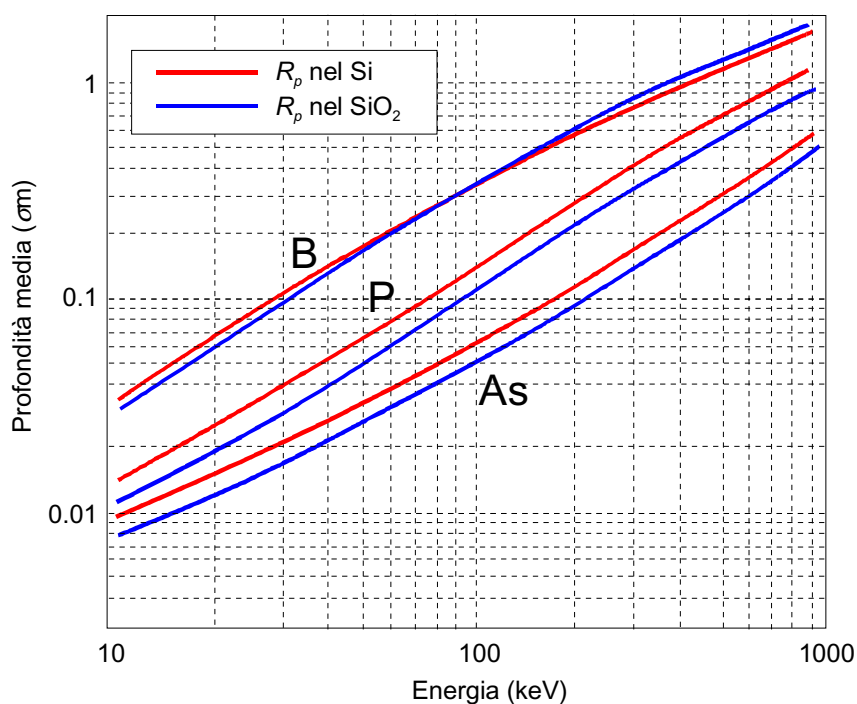
Profilo da impiantazione ionica



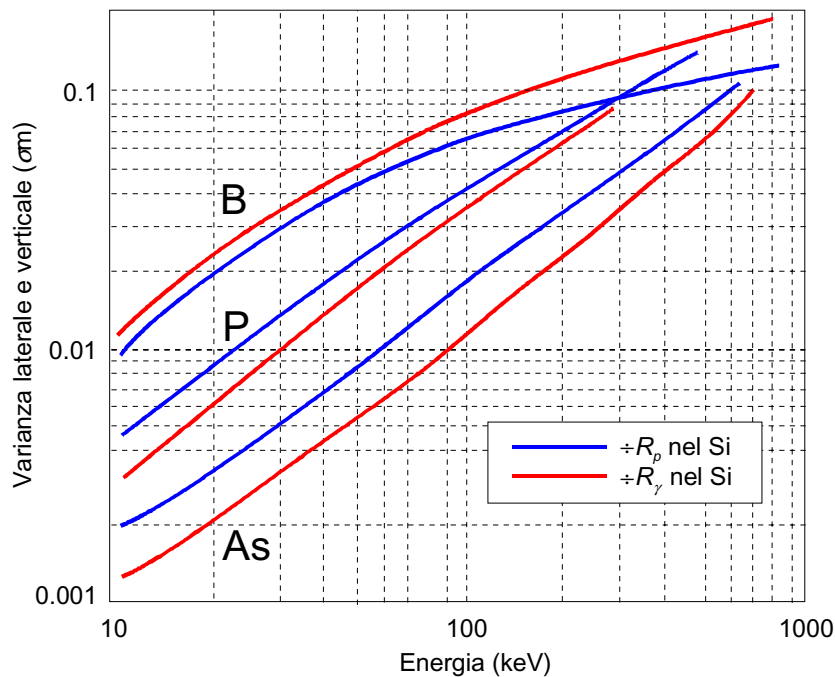
Profilo gaussiano (S dose impiantata, cm^{-2})

$$N_i / x0 | \frac{S}{\sqrt{2\phi \div R_p}} \exp \left(- \frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\div R_p} \right)^2 \right) \quad [at/cm^3]$$

Profondita' media

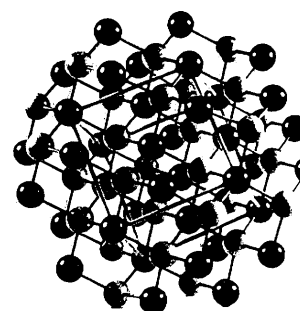
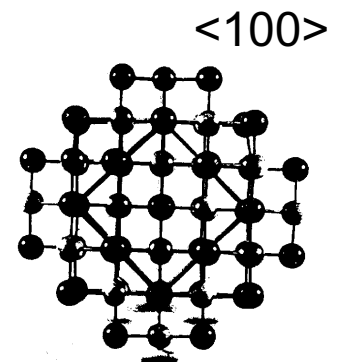
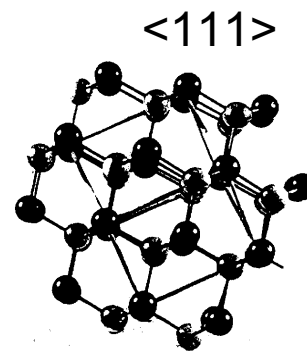


Varianza



Channeling

- *Se il bersaglio non e' disallineato gli ioni seguono cammini preferenziali in cui non interagiscono con il reticolo → profilo risultante di drogaggio non gaussiano*
- *Il channeling si puo' evitare disallineando il bersaglio rispetto al fascio di ioni*



gaussiano
<7° out>

Ricottura (annealing)

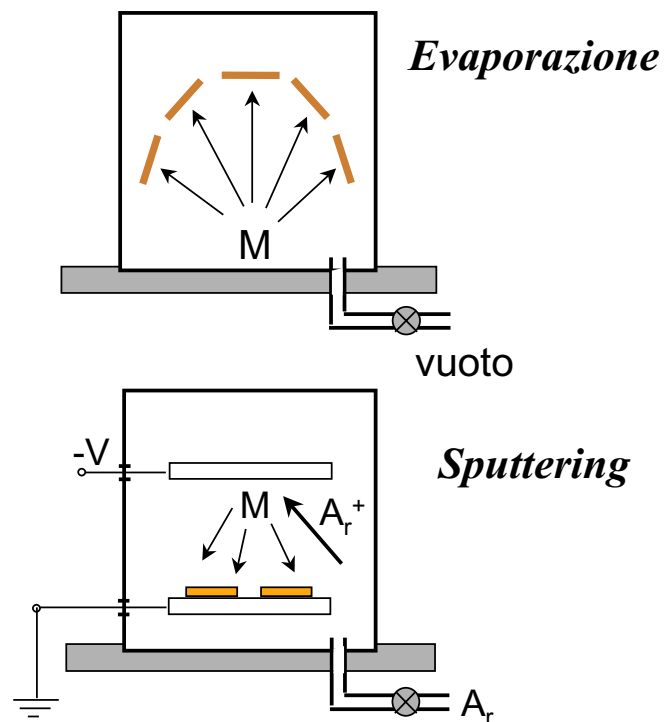
- *Nell'impiantazione ionica il reticolo cristallino viene danneggiato (gli ioni si arrestano cedendo anche energia al reticolo); inoltre gli ioni non sono posizionati in siti sostituzionali → mancata attivazione come droganti*
- *E' necessario trattare termicamente il substrato per riparare il danno reticolare e attivare gli ioni → annealing (ricottura)*
- *Se l'annealing e' di durata lunga (annealing termico) il profilo cambia per diffusione → fast annealing con sorgenti impulsate ad alta energia (e.g. laser)*

Deposizione dielettrici / metalli

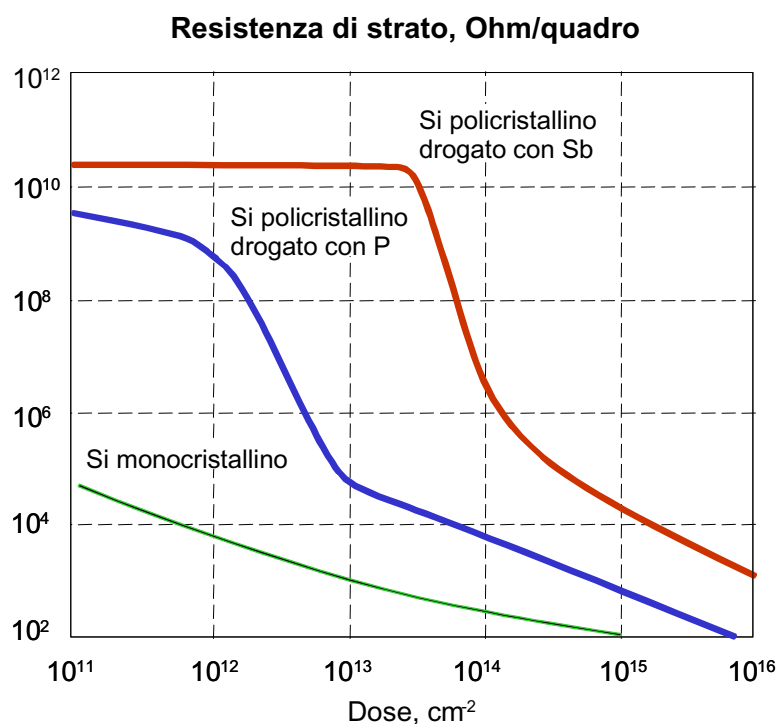
- *Deposizione chimica:*
 - *Il materiale deposto viene creato in loco da una reazione chimica, di solito da fase vapore (CVD)*
 - *Esempi: Ossido di silicio, Nitruro di silicio, Silicio policristallino*
- *Deposizione fisica:*
 - *Il materiale viene deposto direttamente da fase vapore attraverso Evaporazione o Sputtering*
 - *Esempi: metalli (Al)*
- *Altre tecniche:*
 - *Centrifugazione (spinning): fotoresist, polimide*
 - *Crescita galvanica (Au), sinterizzazione (siliciuri)*

Deposizione PVD

- *Evaporazione sottovuoto Metal (es. Al) evaporato da crogiolo per riscaldamento joule o e-beam*
- *Sputtering DC Metallo (es. Al, W, Ti ecc.) emesso dal catodo (target) per bombardamento da ioni Ar*
- *Sputtering RF per dielettrici*



Silicio policristallino (polisilicio)

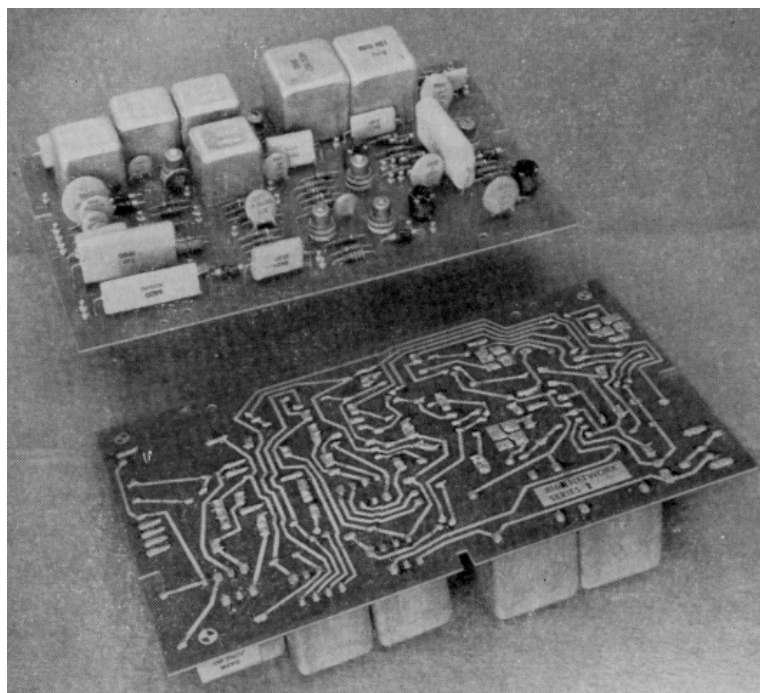


- *Il polisilicio (silicio policristallino) e' utilizzato come conduttore; presenta migliore resistenza a temperature elevate rispetto allo Al*
- *Resistenza di strato: resistenza di un conduttore quadrato di sezione $t \cdot W$ e lunghezza W*

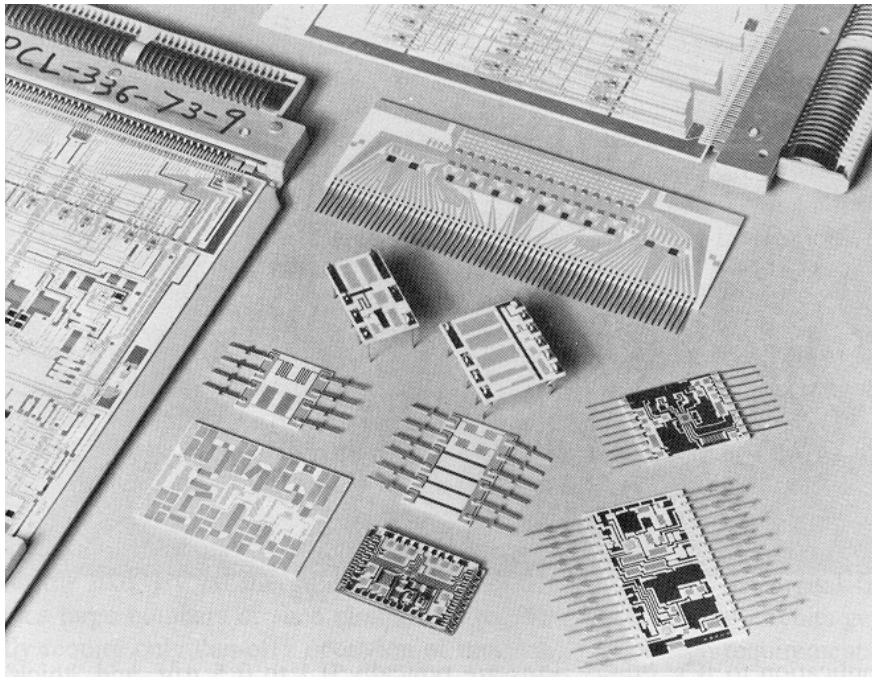
Circuiti discreti, ibridi, integrati

- Circuiti **discreti**: componenti (RLC, componenti attivi) connessi attraverso interconnessioni spesso integrate nel supporto meccanico (circuiti stampati)
- Circuiti **integrati ibridi**: tutti gli elementi sono integrati nel substrato/supporto meccanico, salvo gli attivi; il substrato e' dielettrico, i conduttori film spesso/sottile
- Circuiti **integrati monolitici**: tutti i componenti, attivi e passivi, sono integrati nel substrato semiconduttore (Si, GaAs, InP...)

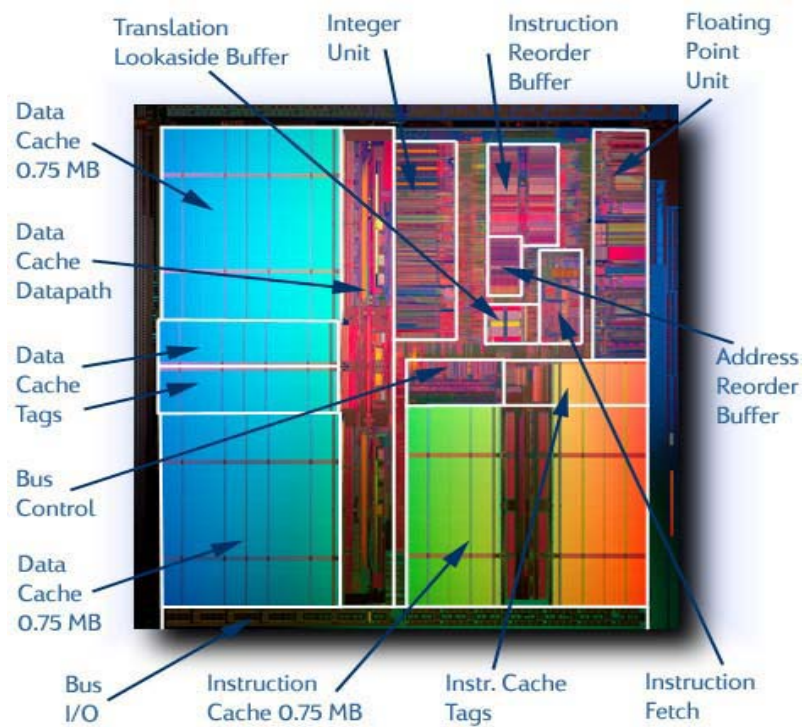
Circuito stampato



Circuito ibrido

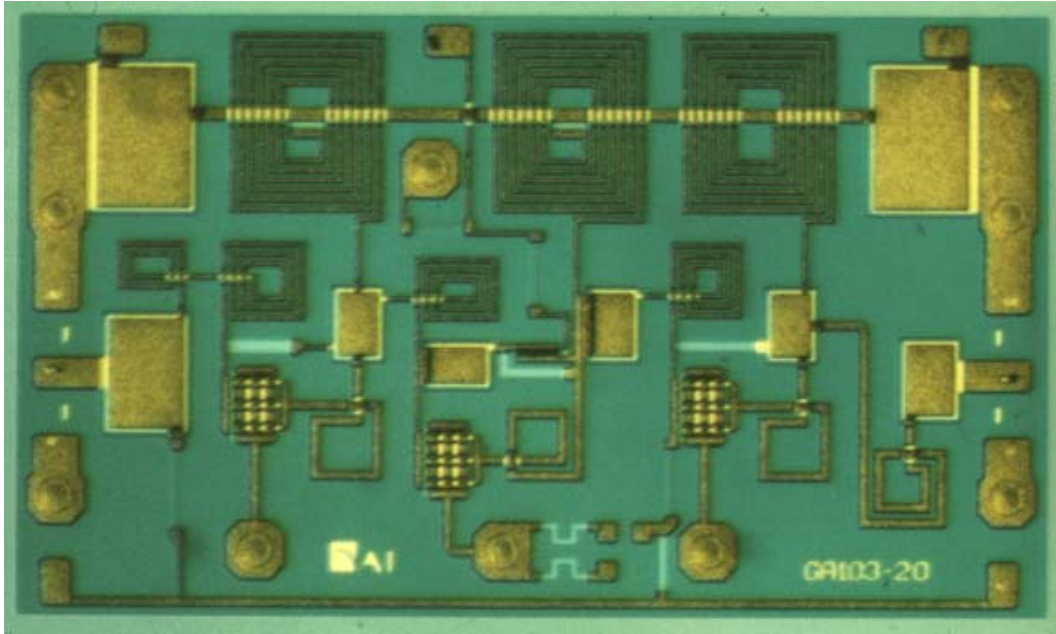


Circuito integrato digitale

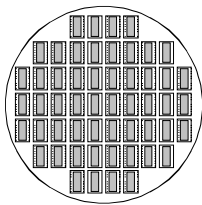


PA-8700 microprocessor

Circuito integrato analogico

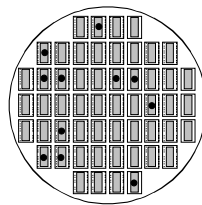


Dicing, testing, packaging



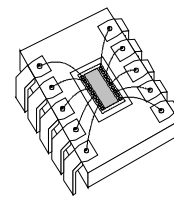
Substrato alla fine del processo

(a)



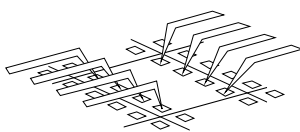
Identificazione chip difettosi

(c)



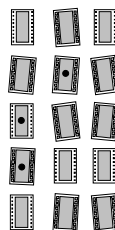
Montaggio in un package dual-in-line

(e)



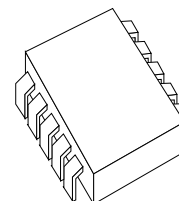
Collaudo automatico

(b)



Taglio del substrato nei singoli chip

(d)



Chiusura del package

(f)

Bonding: wire, flip-chip

