

Ossidazione termica



Francesco Biagini

Ph.D student

francesco.biagini@phd.unipi.it

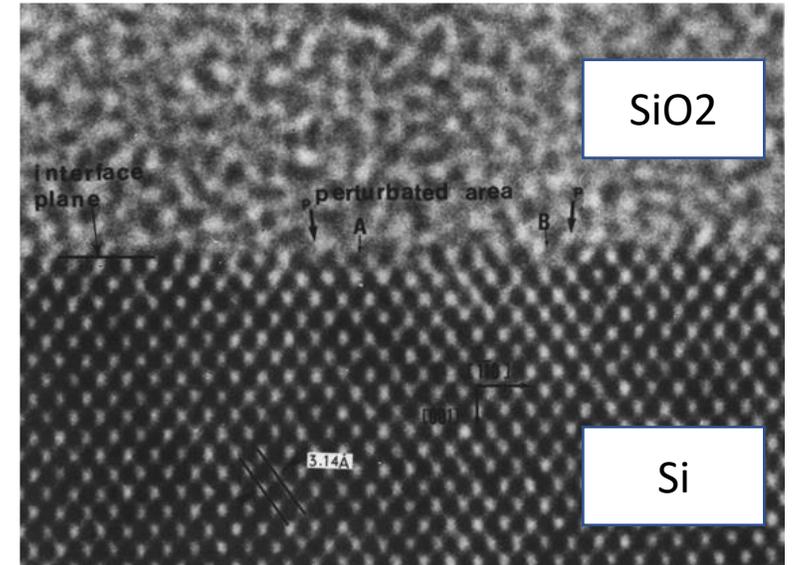
Dipartimento di ingegneria
dell'informazione – Università di Pisa

Centro di ricerca Enrico Piaggio

Ossidazione termica del silicio

Proprietà principali

Densità (amorfo)	2,20 g/cm ³
Densità (quarzo)	2,65 g/cm ³
Resistività	1X10 ²⁰ ohm*cm
Punto di fusione	1,713 °C

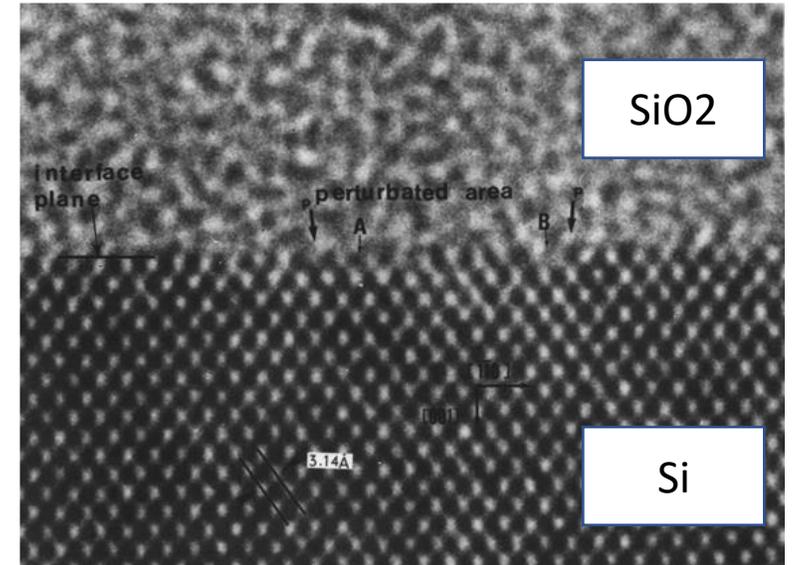
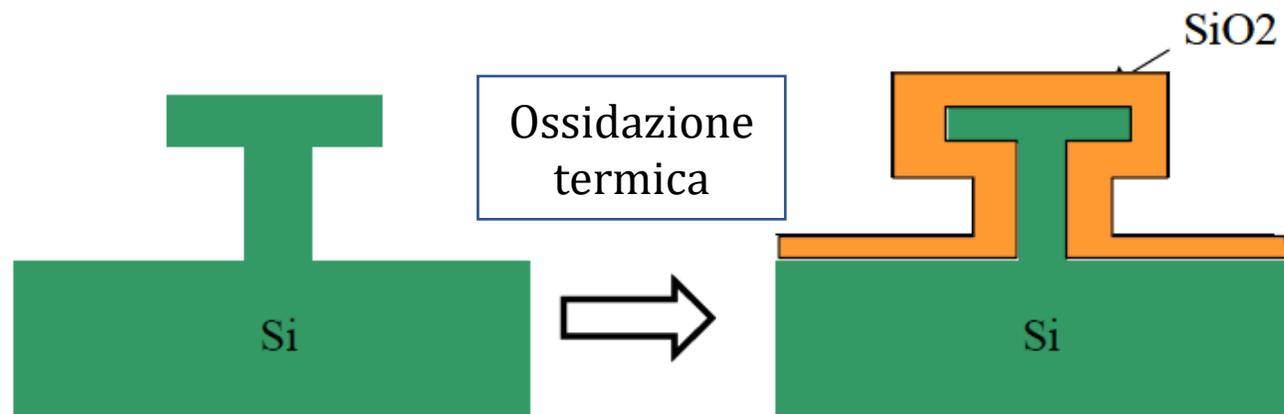


Ossidazione termica del silicio

Proprietà principali

Densità (amorfo)	2,20 g/cm ³
Densità (quarzo)	2,65 g/cm ³
Resistività	1X10 ²⁰ ohm*cm
Punto di fusione	1,713 °C

Crescita uniforme sulla superficie del silicio esposta



Ossidazione termica del silicio

In elettronica può servire a:

- In un **MOSFET** per creare lo **strato di ossido del gate** che ha una funzione di protezione e separazione
- **Isolamento elettrico** tra vari dispositivi
- Utilizzato come **isolamento dei livelli di metallizzazione** delle cariche
 - Produzione di **capacità parassite**
- **Maschera per il drogaggio** (in quanto impermeabile alle cariche)
- **Passivazione** dei dispositivi
 - Resistenti all maggior parte delle soluzioni di etching

Ossidazione termica del silicio - Tecniche

Anodizzazione in plasma

- Camera con due elettrodi
- Gas presenti: ossigeno e azoto
- Tensione di lavoro: 1500/2200 kV
- Wafer di silicio posizionato sull'anodo

- Limiti
 - Strati di ossido molto sottili dell'ordine del raggio atomico dell'ossigeno
 - Alti costi

Ossidazione termica del silicio - Tecniche

Ossidazione anodica

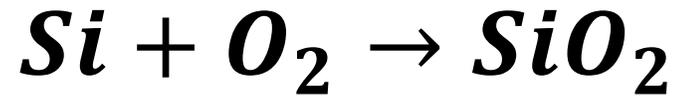
- Il wafer di silicio viene messo in contatto con l'ossigeno
- Applicazione di un campo elettrico (da 10-15 V fino a 100-150 V) tra il wafer di silicio ed un elettrodo di riferimento
- Limiti
 - Tempi lunghi

Ossidazione termica del silicio - Tecniche

Deposizione in fase vapore

- Vaporizzazione dell'acqua e riscaldamento del wafer
- Diffusione dell'ossigeno
- Limiti
 - Tempi lunghi ma economicamente più valido e utilizza materie facilmente reperibili

Ossidazione termica del silicio – Reazione Dry



- Essendo una reazione «dry» non ha una forza scatenante e quindi è una reazione molto lenta
- Non si riescono a creare strati di ossido più lunghi di uno o due volte la larghezza del reticolo cristallino

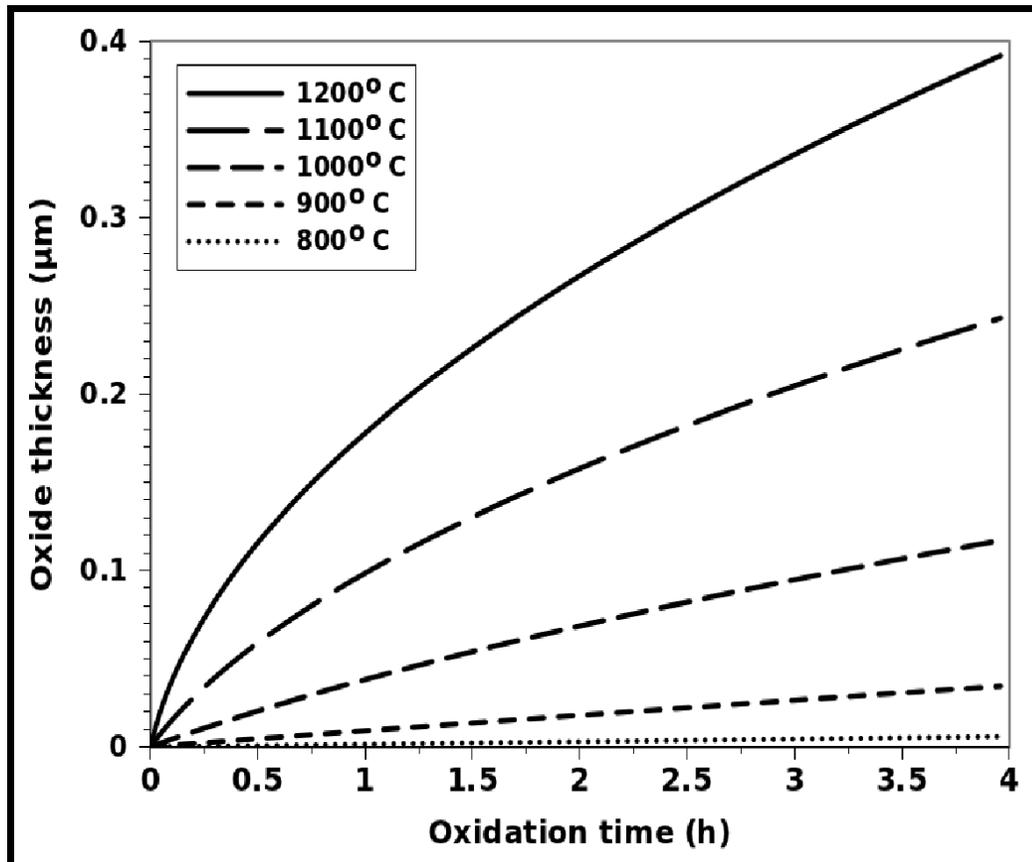
Ossidazione termica del silicio – Reazione Wet



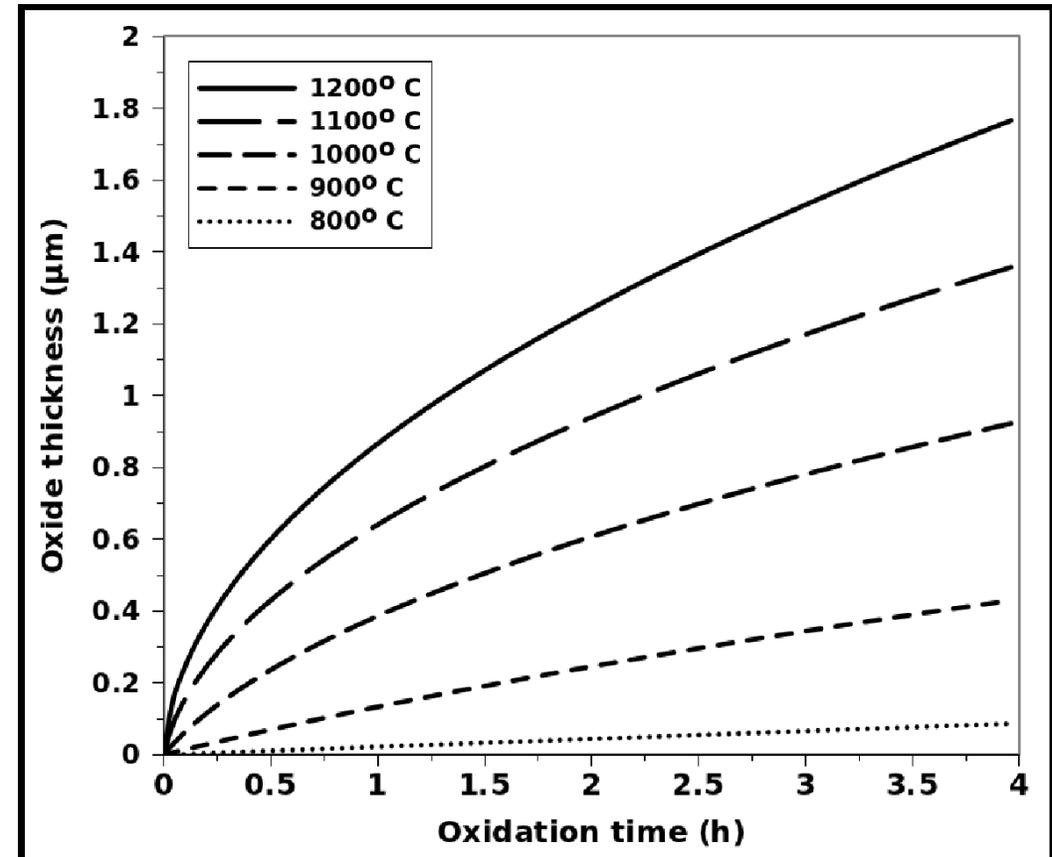
- La reazione avviene tra i 700 e i 1200°C (dipendente dalla profondità)

Ossidazione termica del silicio

Dry



Wet

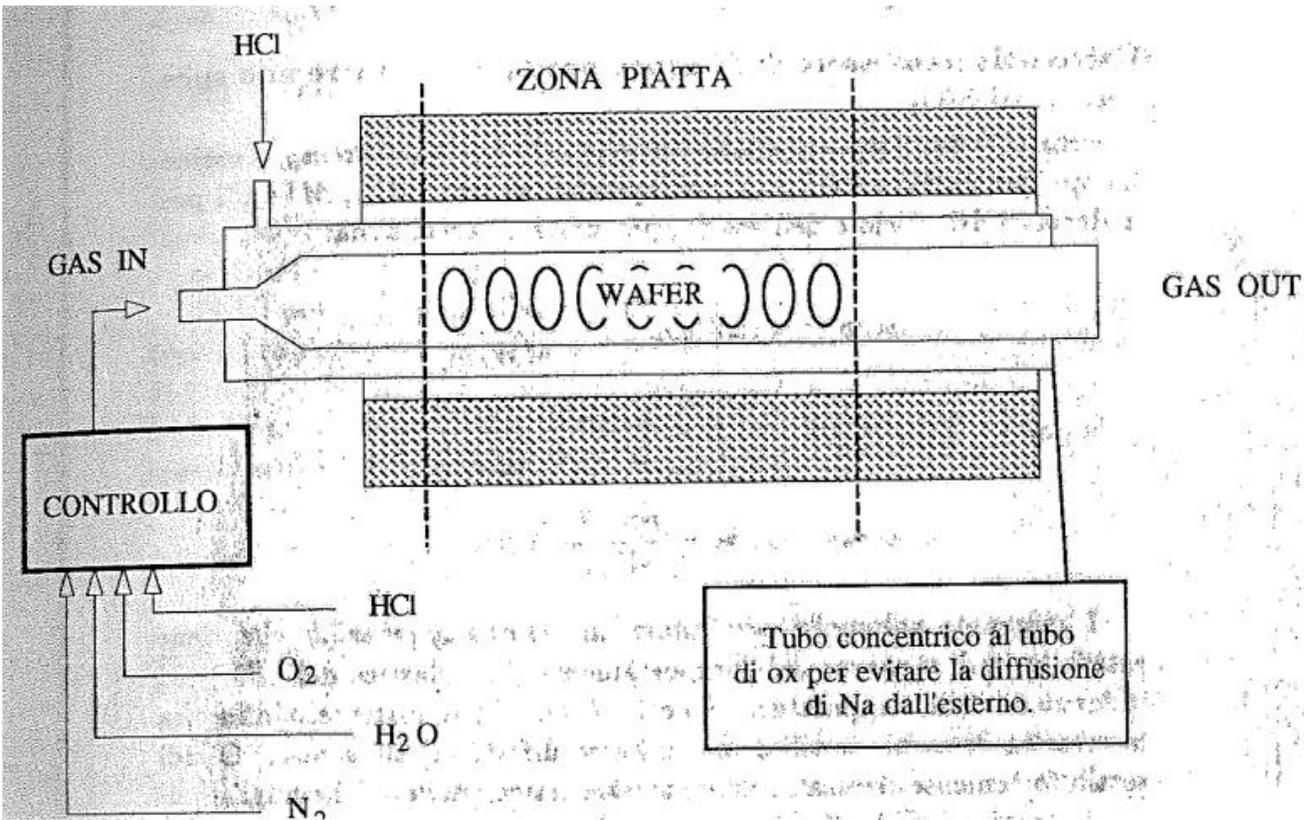


Ossidazione termica del silicio – Forno per ossidazione

- Sistema di riscaldamento
- Valvola di immissione per gas:
 - Vapor acqueo
 - Ossigeno e azoto
 - HCl (effetto depurante dal sodio)

Quali sono i parametri con cui devo controllare il processo?

- Pressioni delle bombole
- Temperatura del processo
- Spessore
- Tempo



Il modello di Deal and Grove

**Flusso
ossidativo**



**Diffusione
Gas**

**Strato
stagnante**

**Diffusione
stato solido**

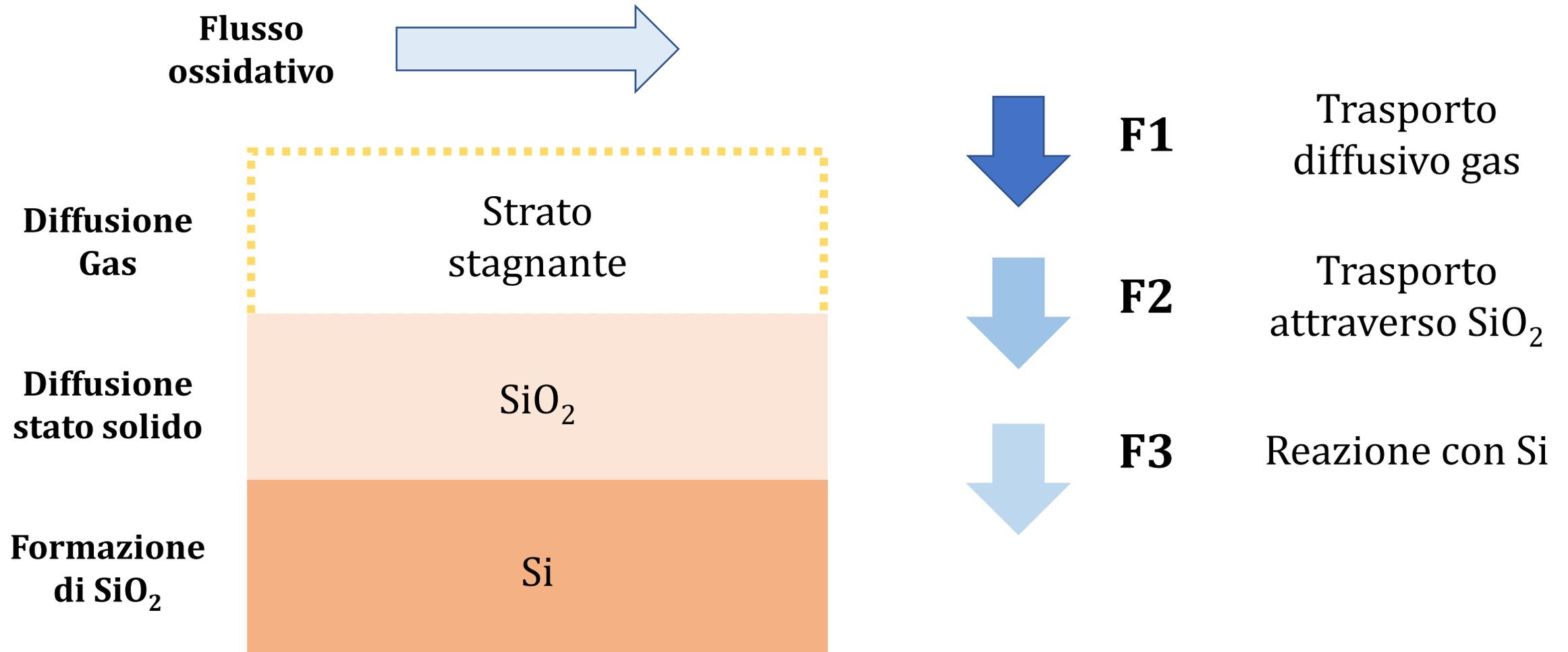
SiO_2

**Formazione
di SiO_2**

Si



Il modello di Deal and Grove



Il modello di Deal and Grove

Flusso
ossidativo



Diffusione
Gas

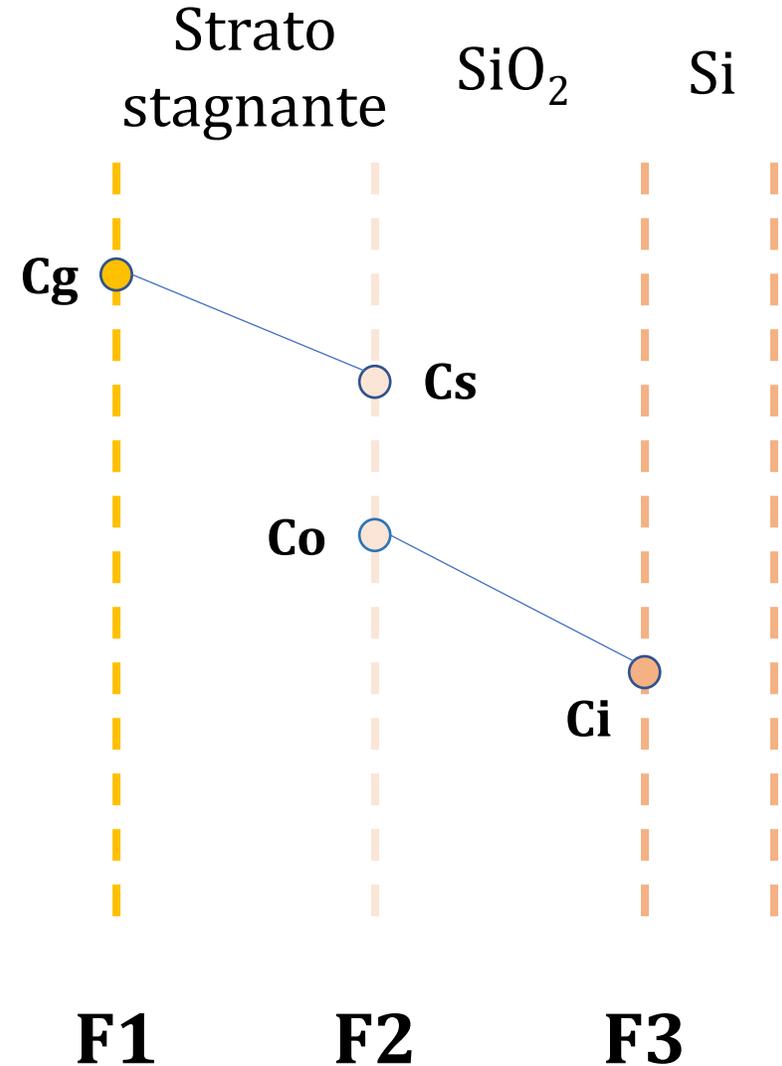
Strato
stagnante

Diffusione
stato solido

SiO_2

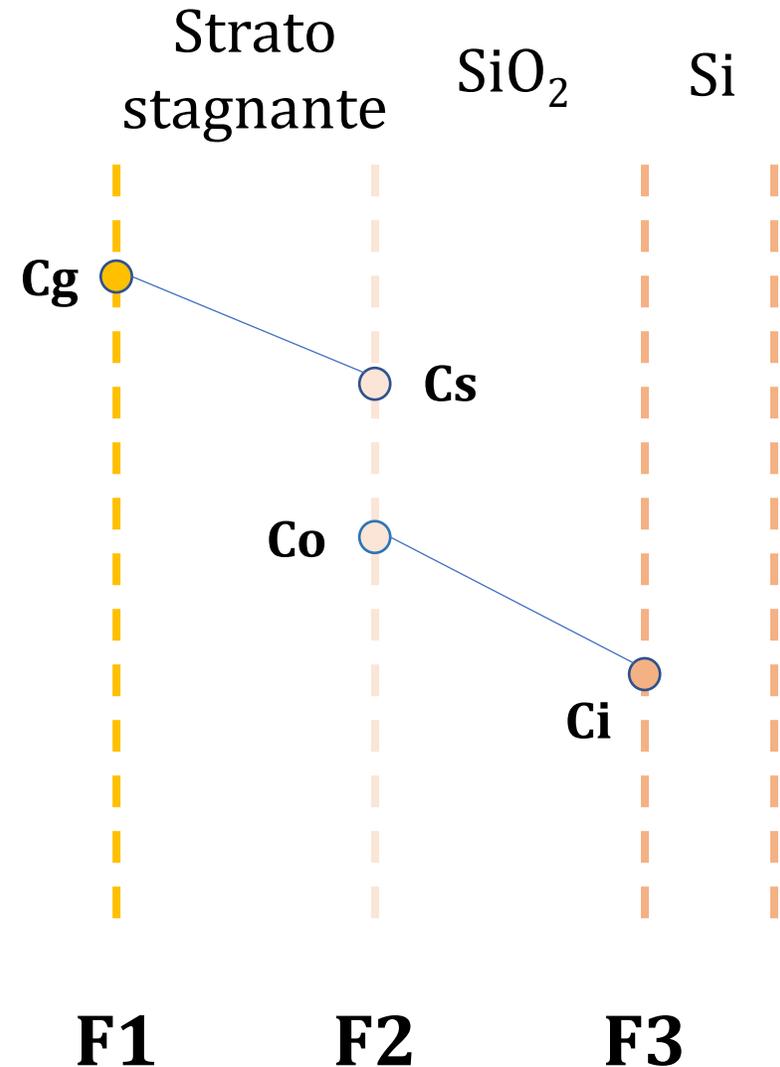
Formazione
di SiO_2

Si



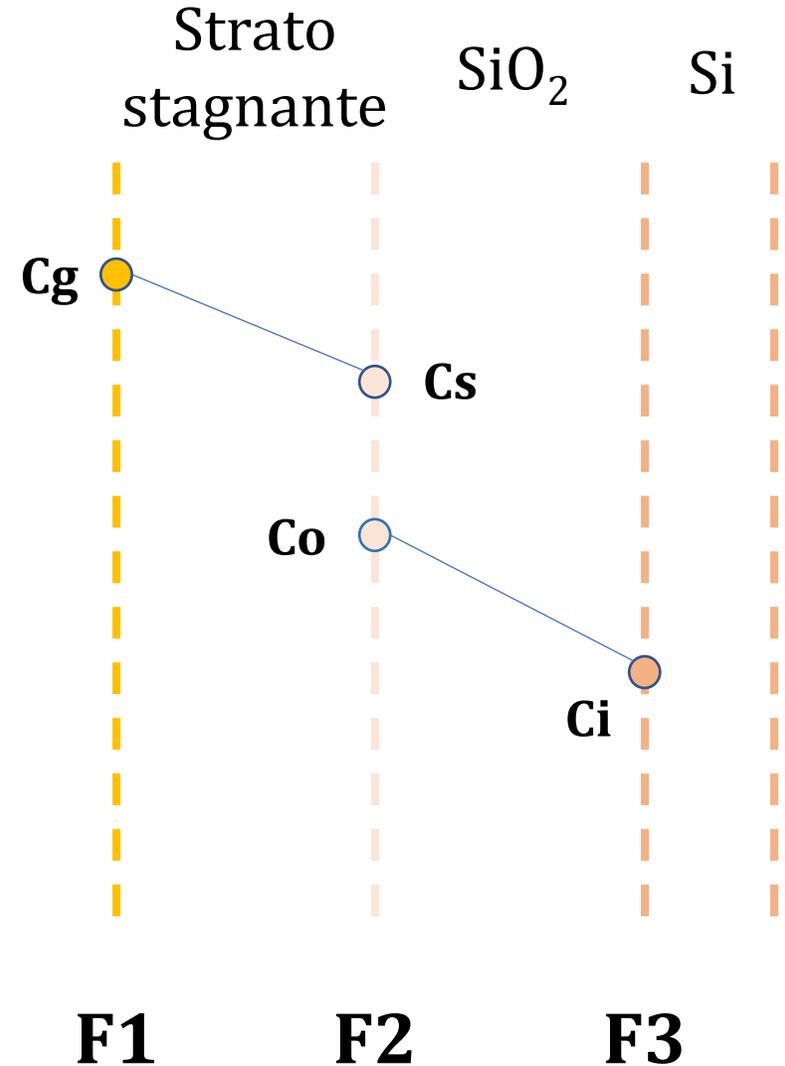
Il modello di Deal and Grove

- **Cs e Co risultano diverse.** È possibile metterle in relazione tramite la legge di Henry
 - **Cg è un parametro di controllo** (concentrazione del gas che vado a mettere)
- **Co e Ci sono le variabili che verranno risolte**

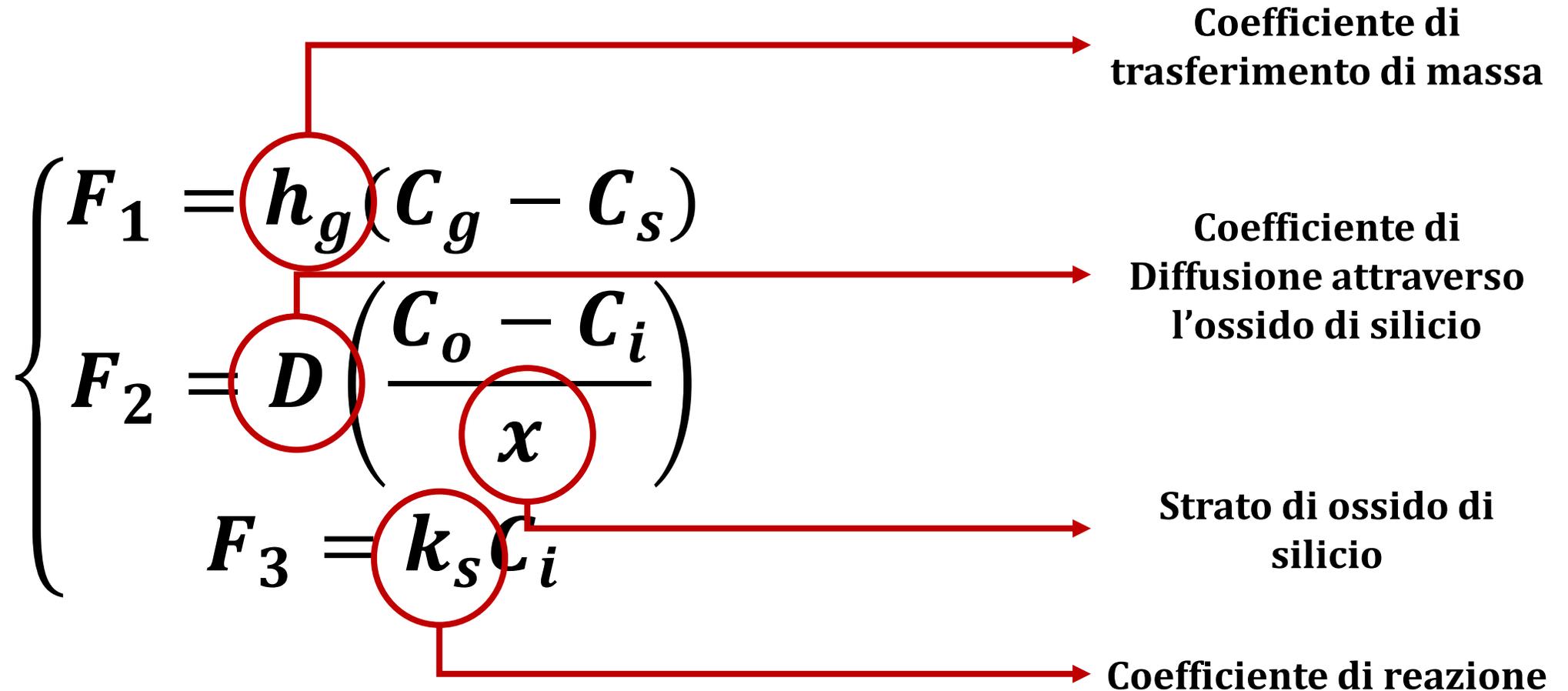


Il modello di Deal and Grove

$$\begin{cases} F_1 = h_g(C_g - C_s) \\ F_2 = D \left(\frac{C_o - C_i}{x} \right) \\ F_3 = k_s C_i \end{cases}$$



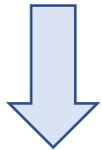
Il modello di Deal and Grove



Il modello di Deal and Grove

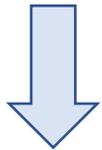
Applicando la legge di Henry si ottiene: (H è la costante di Henry e P_s è la pressione parziale dell'ossigeno)

$$C_o = H * P_s$$



*Utilizzando la legge dei gas perfetti
 $PV = NkT$ dove $k = R/N_a$*

$$C_o = H(kTC_s)$$



$$C_s = \frac{C_o}{HkT}$$

Allo stesso modo

$$C_g = \frac{C_A}{HkT}$$

Il modello di Deal and Grove

Il sistema definito in precedenza diventa:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = \left(\frac{h_g}{HkT} \right) (C_A - C_o) \\ F_2 = D \left(\frac{C_o - C_i}{x} \right) \\ F_3 = k_s C_i \end{array} \right.$$

Il modello di Deal and Grove

Il sistema definito in precedenza diventa:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = \left(\frac{h_g}{HkT} \right) (C_A - C_o) \\ F_2 = D \left(\frac{C_o - C_i}{x} \right) \\ F_3 = k_s C_i \end{array} \right.$$

Allo stazionario:

$$F_1 = F_2 = F_3$$

**Si risolve il seguente sistema
(ricavando C_i e C_o)**

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 = F_3 \text{ (si ricava } C_i) \\ F_2 = F_3 \text{ (si ricava } C_o) \end{array} \right.$$

Il modello di Deal and Grove

Le soluzioni sono:

$$\left\{ \begin{array}{l} C_i = \frac{C_A}{\frac{k_s}{h} + 1 + \frac{k_s x}{D}} \\ C_o = \left(\frac{k_s x}{D} + 1 \right) \left(\frac{C_A}{\frac{k_s}{h} + 1 + \frac{k_s x}{D}} \right) \end{array} \right.$$

Il modello di Deal and Grove

Considerando che:

$$F_1 = F_2 = F_3 = F = N_1 * \frac{dx}{dt}$$

Dove N_1 è il numero di molecole ossidanti/unità di volume richiesto per formare uno strato di lunghezza x di ossido di silicio.

Utilizzando F_3 , si ottiene:

$$N_1 * \frac{dx}{dt} = \frac{k_s C_A}{\frac{k_s}{h} + 1 + \frac{k_s x}{D}}$$

Il modello di Deal and Grove

$$N_1 * \frac{dx}{dt} = \frac{k_s C_A}{\frac{k_s}{h} + 1 + \frac{k_s x}{D}}$$

Si considera che $h \gg ks$ e quindi è possibile trascurarlo

Integrando

$$\int_{x_i}^{x_{ox}} \frac{1}{k_s} + \frac{1}{h} + \frac{x}{D} dx = \int_0^t \frac{k_s C_A}{N} dt$$

Il modello di Deal and Grove

Si ottiene:

$$\frac{x_{ox}^2 - x_i^2}{2D} + \frac{x_{ox} + x_i}{k_s} = \frac{C_A}{N} t$$

Definendo:

$$A = \frac{2D}{k_s}$$

$$B = \frac{2DC_A}{N}$$

Il modello di Deal and Grove

Si ottiene:

$$x_{ox}^2 + Ax = B(t + \tau)$$

$$\text{dove } \tau = \frac{x_i^2 + Ax_i}{B}$$

**Modello di
Deal and
Grove per
l'ossidazione
termica**

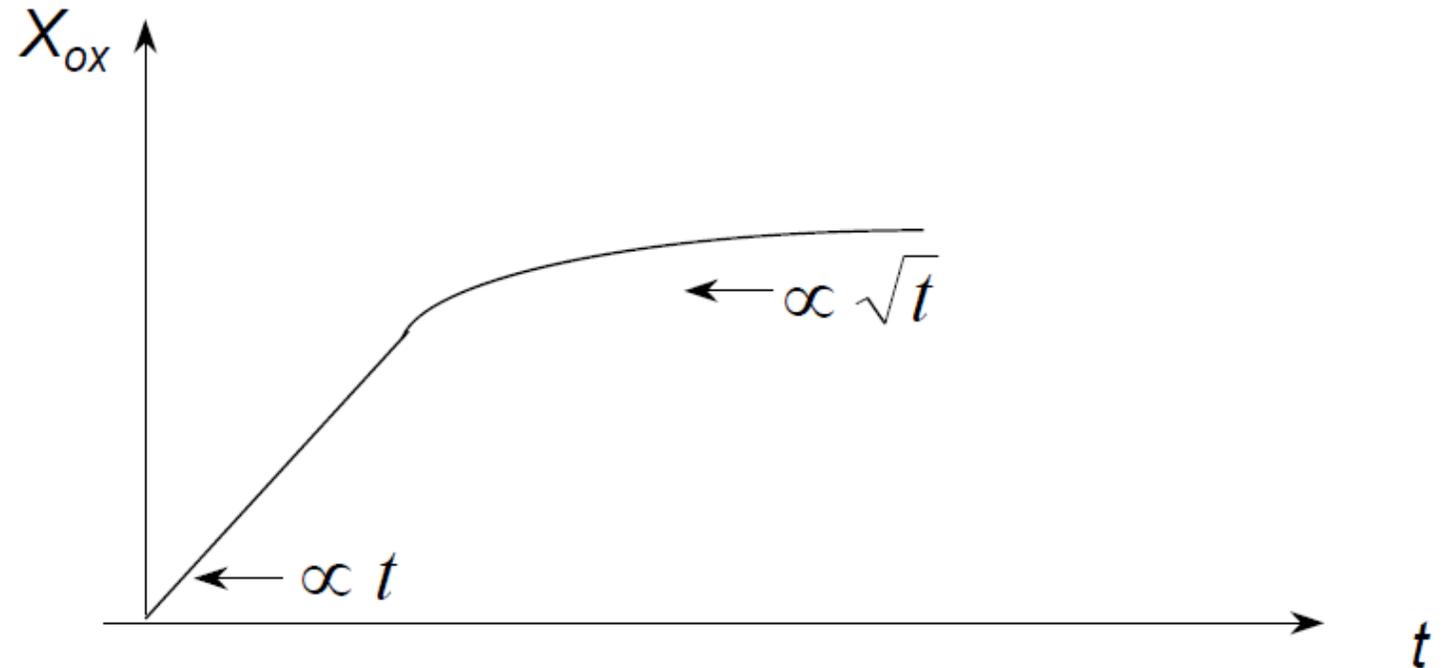
Il modello di Deal and Grove

Per $t \sim 0$

$$x \propto \frac{B}{A} t$$

Per $t \sim \infty$

$$x \propto \sqrt{Bt}$$



Il modello di Deal and Grove - Parametri

$$B = C_1 e^{-\frac{E_1}{kT}} = \frac{2DC_A}{N}$$

Costante parabolica

(E_1 è l'energia di attivazione per la diffusione)

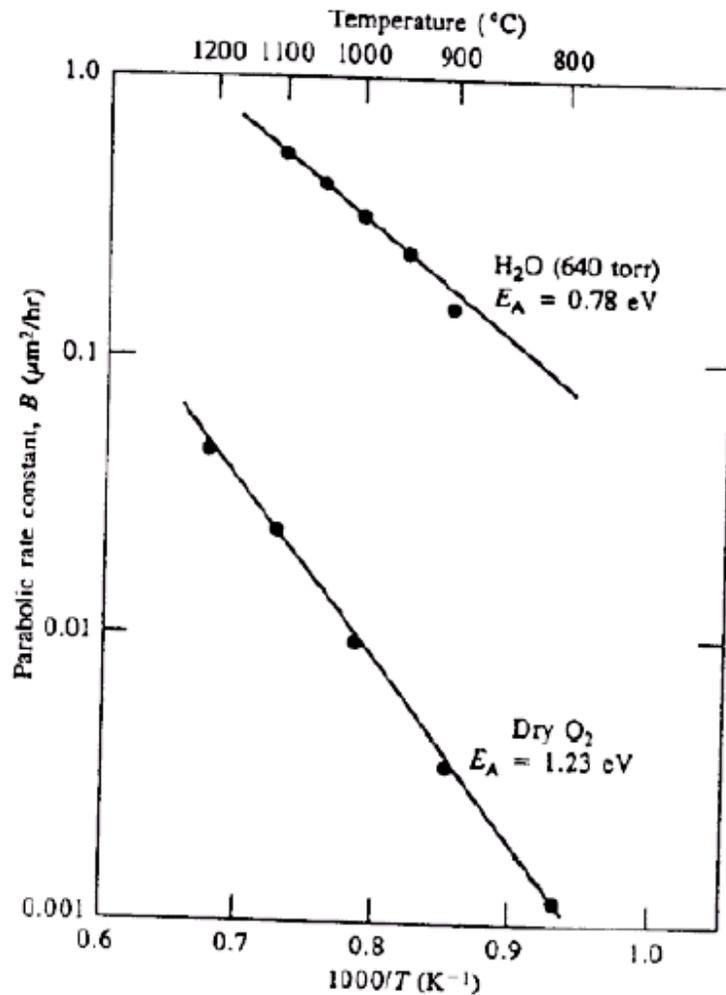
$$\frac{B}{A} = C_2 e^{-\frac{E_2}{kT}} = \frac{C_A}{N \left(\frac{1}{k_s} + \frac{1}{h} \right)}$$

Costante Lineare

(E_2 è l'energia di attivazione per la reazione)

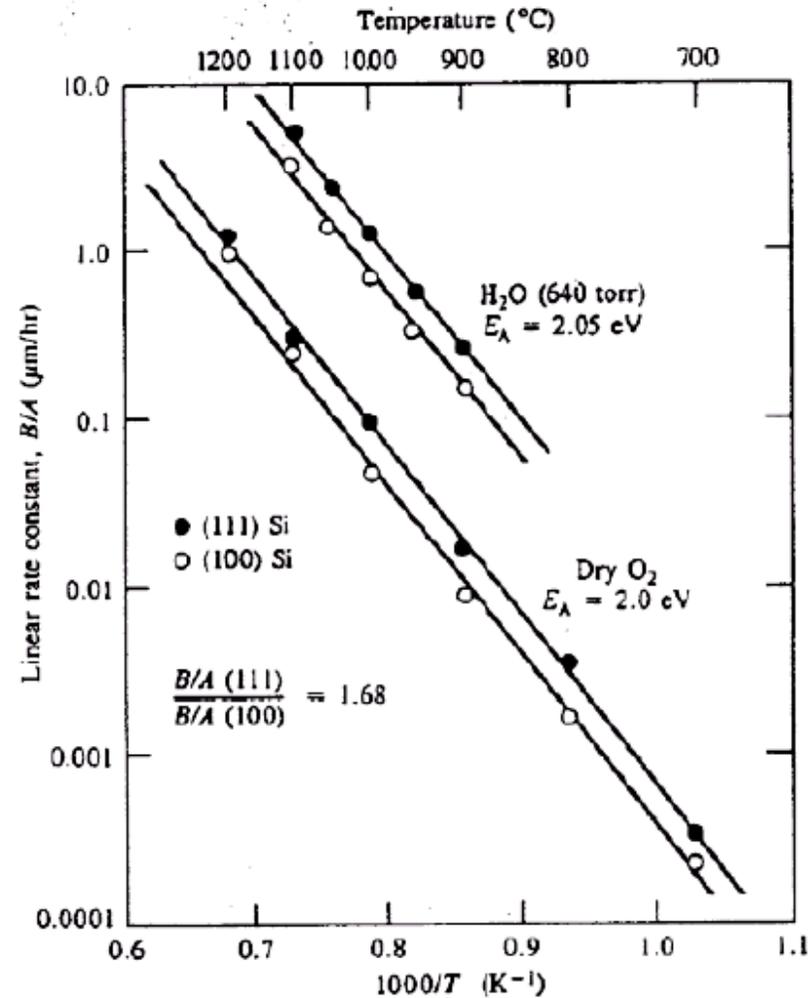
Il modello di Deal and Grove - Parametri

B



B

A



Il modello di Deal and Grove - Esempi

Per valutare lo strato di ossido formato si possono utilizzare due metodi:

1) Ricavare B e B/A dalle tabelle e risolvere l'equazione di Deal and Grove

N.B. Per la configurazione del silicio (111) esistono parametri di processo già tabulati

Dry oxidation

$$\begin{aligned}N_1 &= 2,2 \times 10^{22} / \text{cm}^3 \\ C_1 &= 7,72 \times 10^2 \mu\text{m}^2 / \text{hr} \\ C_2 &= 6,23 \times 10^2 \mu\text{m}^2 / \text{hr} \\ E_1 &= 1,23 \text{ eV/molecola} \\ E_2 &= 2,0 \text{ eV/molecola} \\ x_i &= 0 \text{ \AA}\end{aligned}$$

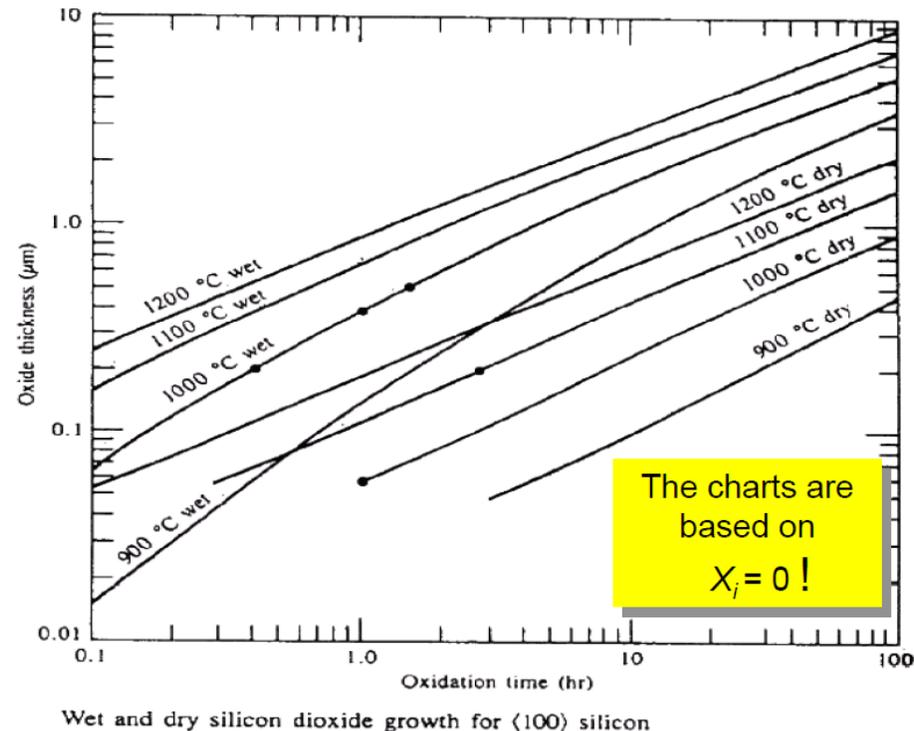
Wet oxidation

$$\begin{aligned}N_1 &= 4,4 \times 10^{22} / \text{cm}^3 \\ C_1 &= 2,24 \times 10^2 \mu\text{m}^2 / \text{hr} \\ C_2 &= 8,95 \times 10^2 \mu\text{m}^2 / \text{hr} \\ E_1 &= 0,71 \text{ eV/molecola} \\ E_2 &= 1,97 \text{ eV/molecola} \\ x_i &= 200 \text{ \AA}\end{aligned}$$

Il modello di Deal and Grove - Esempi

Per valutare lo strato di ossido formato si possono utilizzare due metodi:

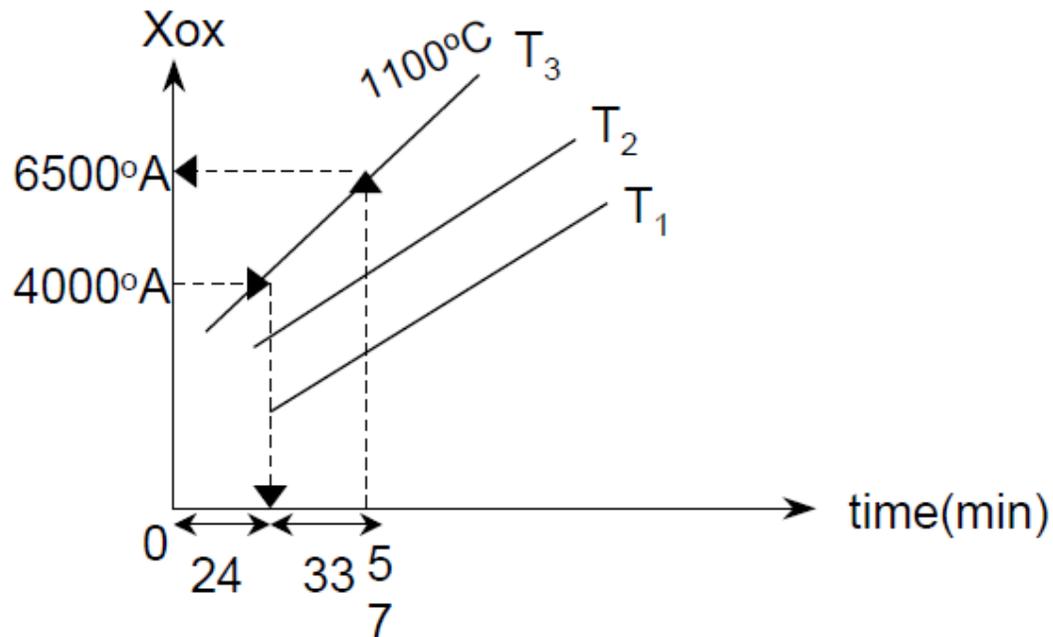
2) Utilizzare le tavole di ossidazione



Il modello di Deal and Grove - Esempi

Per valutare lo strato di ossido formato si possono utilizzare due metodi:

2) Utilizzare le tavole di ossidazione



$$x_i = 4000 \text{ \AA}$$
$$\tau = 24 \text{ min}$$
$$t = 33 \text{ min}$$
$$x_f = 6500 \text{ \AA}$$