

Scopo della lezione:

- *descrivere il ruolo dei film isolanti nei dispositivi microelettronici*
- *descrivere le modalita' di formazione dei film isolanti in microtecnologia*

I film isolanti in microtecnologia vengono usati per:

- *passivare regioni ad alto campo elettrico sulla superficie del semiconduttore*
- *prevenire la diffusione al di fuori di aree selezionate*
- *mascherare la superficie del semiconduttore nell'impiantazione ionica*
- *creare uno strato isolante nella regione di gate dei MOS transistor*
- *proteggere il circuito alla fine del processo di lavorazione*

Il piu' usato tra gli isolanti e' il biossido di silicio (SiO₂).



E' possibile fare una distinzione tra gli ossidi ottenuti fornendo il Si dall'esterno e quelli ottenuti utilizzando il Si del substrato. L'ossigeno viene comunque fornito dall'esterno, in forme diverse, dando luogo a ulteriori classificazioni degli ossidi prodotti

Ossidi depositati

Sono quegli ossidi il cui il silicio, al pari dell'ossigeno, e' fornito dall'esterno in forma gassosa. La tecnica di deposizione usata e' detta CVD, Chemical Vapour Deposition.

Caratteristiche:

- *reagenti: SiH₄, O₂*
- *carrier: Azoto (N)*
- *Temperatura: 200-500 C*
- *pressione: atmosferica*
- *rate di deposizione: 70 nm/min*

*LPCVD=low pressure CVD (p=1 Torr,
r.d.=10 nm/min)*

Ossidi termici

Sono quegli ossidi in cui il silicio e' fornito direttamente dal substrato (il processo avviene ad alte temperature)

Caratteristiche:

- *non occorre una sorgente di Si*
- *lo spessore del silicio diminuisce durante la crescita dell'ossido (in misura di $0.45 t$ con $t =$ spessore dell'ossido)*

L'ossigeno puo' essere fornito in due modi:

- *come gas: (dry oxide)*



- *come vapore: (wet oxide)*



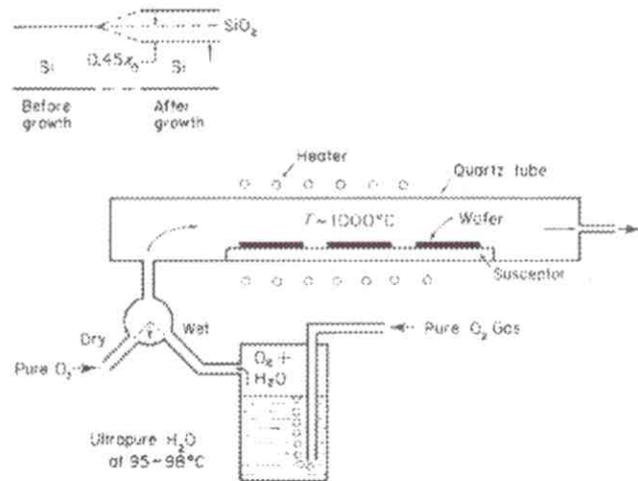
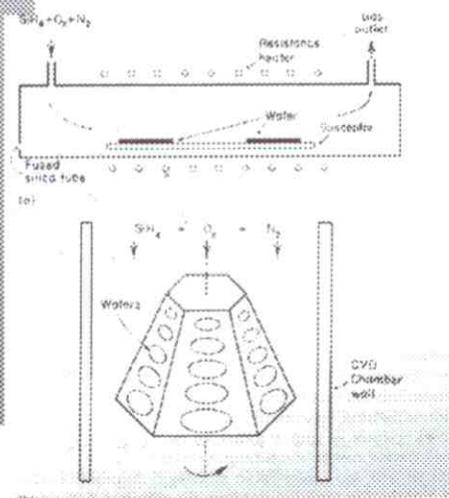


Fig. 4.2 Thermal oxidation system

Sistemi per l'ossidazione

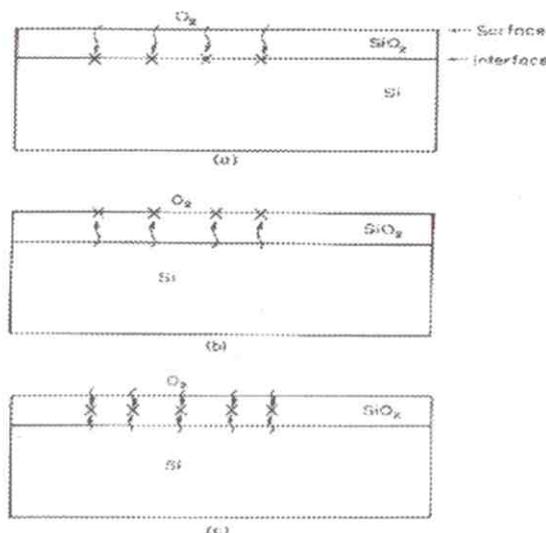
Per l'uniformità di spessore dell'ossido, e' molto importante che la temperatura del substrato sia uniforme sull'intera superficie

Modalita' di formazione degli ossidi termici

Come si puo' notare in figura, esistono, in linea di principio, tre modi in cui la reazione tra ossigeno e silicio puo' avvenire. Nella realta' e' stato dimostrato sperimentalmente che e' l'ossigeno ad attraversare il film di ossido e che la reazione avviene all'interfaccia tra silicio e ossido. Pertanto la velocita' di crescita dell'ossido termico e' regolata da:

- mobilita' dell'ossigeno nell'ossido;
- velocita' di reazione

7.4 INSULATING FILMS ON SEMICONDUCTORS



Film isolanti

-8-

Cerchiamo la relazione tra lo spessore dell'ossido e il tempo impiegato ad ottenere tale spessore nel caso di ossidi termici

Per ipotesi il flusso di materiale ossidante attraverso l'ossido segue la legge di Fick:

$$F_0 = -D_0 \frac{dN}{dx} = \frac{D_0(N_s - N_i)}{x_0}$$

F_i rappresenta il numero di molecole di ossidante consumate all'interfaccia per la produzione di SiO_2 . E' ragionevole che $F_i = K_i N_i$

All'equilibrio, $F_0 = F_i = F_f$


$$N_i = \frac{N_s}{1 + k_i x_0 / D_0}$$

Se occorrono N_m molecole di ossidante per produrre un volume unitario di SiO_2 , lo spessore del film cresce secondo la legge:

$$\frac{dx_0}{dt} = \frac{F_f}{N_m} = \frac{N_s / N_m}{1/k_i + x_0 / D_0}$$

da cui, integrando si ottiene: $x_0 - x_i + \frac{k_i}{2D_0}(x_0^2 - x_i^2) = \frac{N_s k_i t}{N_m}$

Film isolanti

-9-

In conclusione:

$$x_0 = \frac{A}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{t + \tau_0}{A^2/4B}} - 1 \right]$$

$$A = 2D_0/k_i, B = 2D_0N_s/N_m, \tau_0 = (x_i^2 + Ax_i)/B$$

x_i e' il valore iniziale dello spessore del film.

Alternativamente, si puo' ricavare il tempo necessario ad ottenere un film di spessore x_0 :

$$t = \frac{A^2}{4B} \left[\left(\frac{2x_0}{A} + 1 \right)^2 - 1 \right] - \tau_0$$

con

$$A = K_1 e^{+E_1/kT}, B = K_2 e^{-E_2/kT}$$

Table 4.1 Numerical values of parameters for oxide thickness calculations

| Parameter | (111) Silicon | | | (100) Silicon | | |
|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | Wet | Pyrolytic | Dry | Wet | Pyrolytic | Dry |
| K_1 (μm) | 2.39 $\times 10^{-6}$ | 2.37 $\times 10^{-6}$ | 1.24 $\times 10^{-4}$ | 4.02 $\times 10^{-6}$ | 3.98 $\times 10^{-6}$ | 2.08 $\times 10^{-4}$ |
| K_2 ($\mu\text{m}^2/\text{hour}$) | 214 | 386 | 772 | 214 | 386 | 772 |
| E_1 (eV) | 1.29 | 1.27 | 0.77 | 1.29 | 1.27 | 0.77 |
| E_2 (eV) | 0.71 | 0.78 | 1.23 | 0.71 | 0.78 | 1.23 |
| x_i (μm) | 0 | 0 | 0.02 | 0 | 0 | 0.02 |

($k = 8.63 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$).

Film isolanti

-10-

Casi particolari:

■ piccoli spessori (reaction-rate-limited)

se $t + \tau_0 \ll A^2/4B$

allora: $x_0 = \frac{B}{A}(t + \tau_0)$

grandi spessori: (diffusion-rate-limited)

se $t + \tau_0 \gg A^2/4B$

allora: $x_0 = (Bt)^{1/2}$

Si noti come gli wet oxide crescano molto piu' velocemente dei dry oxide (E_2 e' doppia nel caso wet e K_2 e' maggiore nel caso dry)

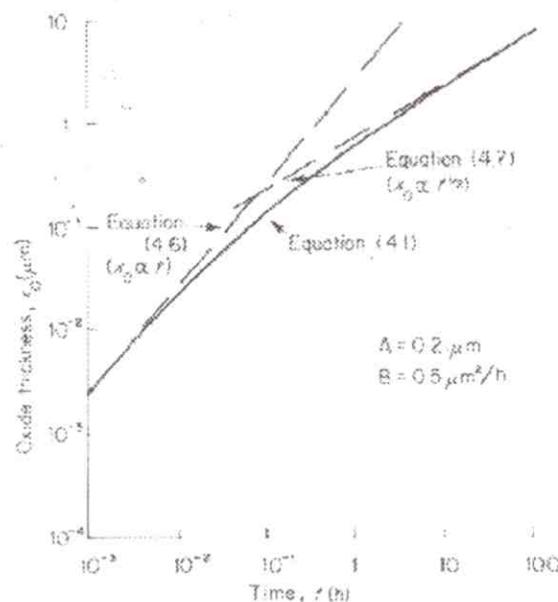


Fig. 4.4 Approximate and accurate forms for the dependence of oxide thickness

Ulteriori effetti

- Aumento della velocità di crescita dell'ossido se il silicio è drogato
- Miglioramento della qualità dell'ossido per aggiunta di piccole quantità di HCl all'ossigeno nel caso dry
- redistribuzione delle impurità
- Aumento del ritmo di crescita dell'ossido all'aumentare della pressione parziale della specie ossidante

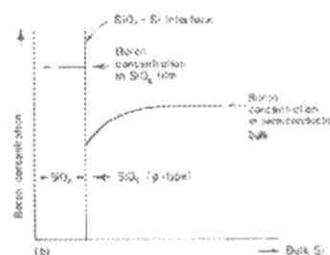
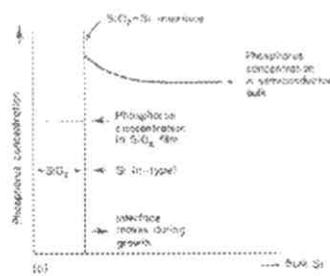
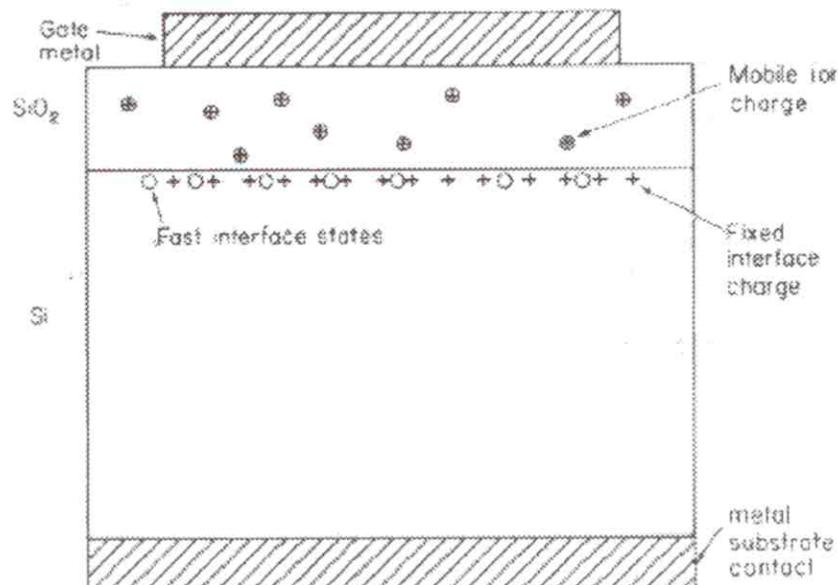


Fig. A.5 Impurity distribution at oxide interface: (a) phosphorus impurity; (b) boron impurity

Verifica della qualita' dell'ossido

Ci sono tre importanti fattori che possono influenzare la qualita' degli ossidi:

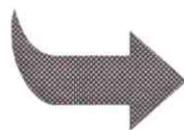
- carica fissa all'interfaccia degli ossidi cresciuti termicamente: e' maggiore nel caso wet e puo' essere ridotta tramite annealing in gas inerte oppure incorporando HCl nel caso dry
- presenza di ioni mobili a causa di contaminazione con Na
- stati trappola vicino all'interfaccia ossido-semiconduttore



- Quali sono i criteri di scelta del processo tecnologico di crescita dell'ossido?

Dipende dall'applicazione: tipicamente per strati di protezione e' piu' opportuno depositare l'ossido piuttosto che crescerlo termicamente per evitare che il substrato venga intaccato.

Per quanto riguarda applicazioni di tipo MOS, ci sono due tipi di ossido da crescere: uno serve da isolamento tra le varie parti attive mentre l'altro e' quello che sta a diretto contatto con il gate e che ha un ruolo essenziale nel funzionamento del dispositivo. Nel primo caso, l'ossido deve essere spesso (1 μm) e non ci sono particolari richieste di qualita'. Pertanto si preferisce un processo veloce anche se con risultati qualitativi peggiori (wet oxide). Nel secondo caso, invece, l'ossido e' sottile (0.1 μm) e deve essere di qualita' eccezionale.



dry oxide

Altri tipi di film isolanti

■ *Nitruro di silicio*

si usa in casi particolari, quando si voglia realizzare il drogaggio di un semiconduttore con specie per le quali la velocità di diffusione nell'ossido non sia sufficientemente bassa.

Es. Ga, Al, Zn, Na, O₂

Si usa depositare il nitruro con la tecnica CVD, realizzando una reazione tra silano e ammoniaca a 800-1000 C. I film di nitruro presentano un'alta densità di stati superficiali (tale proprietà viene usata anche in applicazioni particolari).

Quando si cresce SiO₂ su Si₃N₄ si ha la conversione del nitruro in ossido secondo la proporzione 1:1.7

■ *Film di silicio policristallino (o polisilicio)*

Si tratta di un film la cui conducibilità può essere fortemente variata a seconda del drogaggio. La relazione tra concentrazione dei droganti e conducibilità è però fortemente non lineare a causa del possibile accumulo (e conseguente "disattivazione" elettrica) di droganti nelle zone di confine tra i domini cristallini.