TECNOLOGIE MICROELETTRONICHE

[Fotocopie di Appunti PARTE 1]

A CURA DI ALESSANDRO PAGHI

PROFESSORE: Francesco Pieri (http://unimap.unipi.it/cercapersone/dettaglio.php?ri=4932)

LINK AL CORSO ANNO 2016/2017: http://elearn.ing.unipi.it/enrol/index.php?id=785

FREQUENTAZIONE: Consigliata.

MONOCRISTALLI DI SILICIO (Si)

Monocristallino: Si dice di un materiale formato da un singolo cristallo.

Policristallino: Si dice di un materiale formato da più cristalli.

Amorfo: Si dice di un materiale nel quale gli atomi sono posti in maniera casuale.

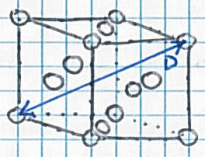
Perché si adopera un monocristallo:
- Resistività minore;
- Mobilità maggiore;

Perché si usa il silicio?
- Economico;
- Chimicamente stabile;
- Tecnologia di fabbricazione;
- Energia di Gap;
- Interfaccia $Si - SiO_2$;

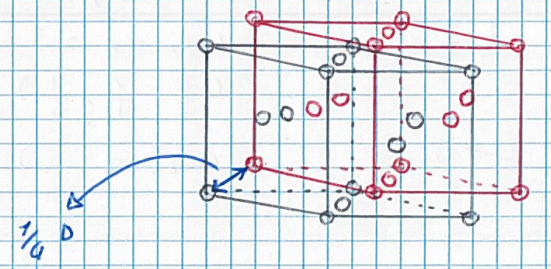
STRUTTURA CRISTALLINA DEL SILICIO

Cubica a facce centrate (FCC)
Gli atomi sono disposti ai vertici ed al centro di ogni faccia.

Cella elementare



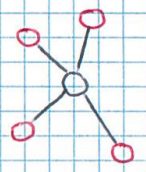
Cella Reale:
È la ripetuta di una traslazione di 1/4 della lunghezza della diagonale principale, lungo la stessa.



www.alessandropaghi.it

Ogni atomo ha la proprietà di possedere 4 primi vicini, ovvero 4 atomi alla stessa distanza.

Caratteristiche Si:



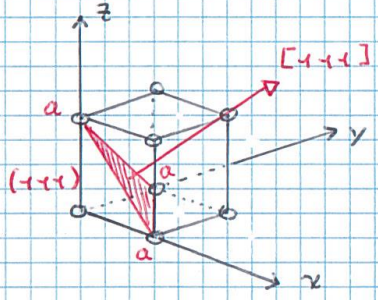
- Passo Reticolare: 0,543 nm
- Distanza Interatomica: 0,235 nm
- Numero atomico: 14
- Densità: 2330 Kg/m^3
- Densità atomica: $5 \cdot 10^{22}\ cm^{-3}$
- Punto di fusione: 1417° C

Passo reticolare: lunghezza lato della cella

Distanza interatomica: lunghezza atomo - primo vicino

INDICI DI MILLER

Parametri che identificano un piano univocamente.



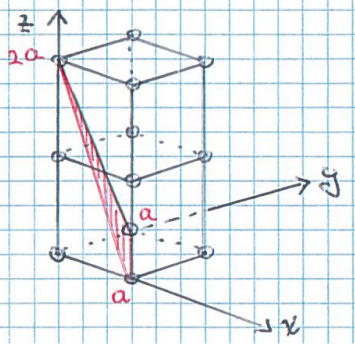
Passo reticolare: a

(a, a, a)	Distanze assi
$(\frac{a}{a}, \frac{a}{a}, \frac{a}{a})$	Divisione per a
$(1, 1, 1)$	
$(\frac{1}{1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{1})$	Inversione
$(1, 1, 1)$	INDICI DI MILLER

(1,1,1) Indica il piano considerato

[1,1,1] Indica la direzione perpendicolare al piano

Ulteriori esempi:



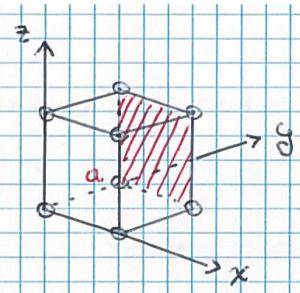
$(a, a, 2a)$

$(1, 1, 2)$

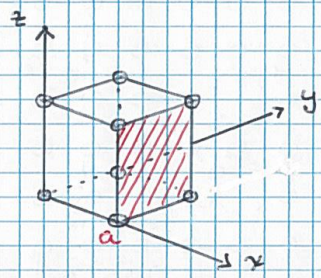
$(\frac{1}{1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{2})$

$(2, 2, 1)$

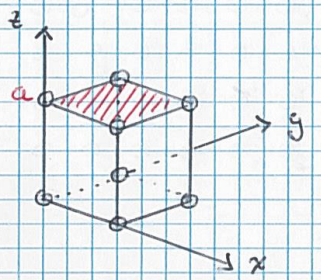
www.alessandropaghi.it



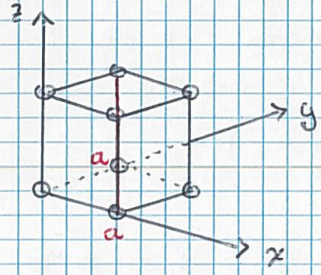
(∞, 0, ∞)
(∞, 1, ∞)
(0, 1, 0)



(0, ∞, ∞)
(1, ∞, ∞)
(1, 0, 0)



(∞, ∞, a)
(∞, ∞, 1)
(0, 0, 1)



(0, 0, ∞)
(1, 1, ∞)
(1, 1, 0)

La densità di atomi per unità di superficie dipende dall'orientazione cristallina.

www.alessandropaghi.it

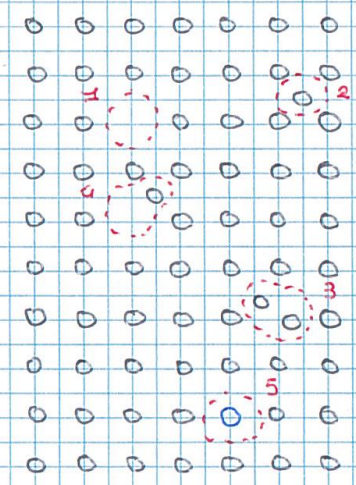
DIFETTI

Deformazione della periodicità del reticolo cristallino.

Classificazione per dimensionalità:

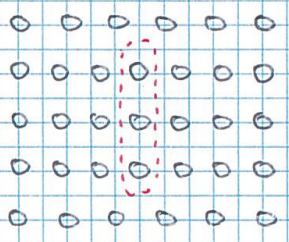
DIFETTI DI PUNTO

1) Vacanza: mancanza di un atomo in posizione reticolare → può catturare un portatore di carica e può muoversi se vicino di T.
2) Interstiziale: presenza di un atomo in posizione non reticolare.
3) Interstiziale doppio: presenza di due atomi in posizioni non reticolari.
4) Difetto Frankel: coppia vacanza - interstiziale.
5) Impurezza: atomo di un altro tipo in posizione reticolare. È un drogante che se varia sensibilmente i valori di n e p.



DIFETTI LINEARI

Dislocazione: presenza di una fila di atomi di troppo.
Si formano in presenza di gradienti di stress indotti da discontinuità con altri materiali o da gradienti di temperatura.

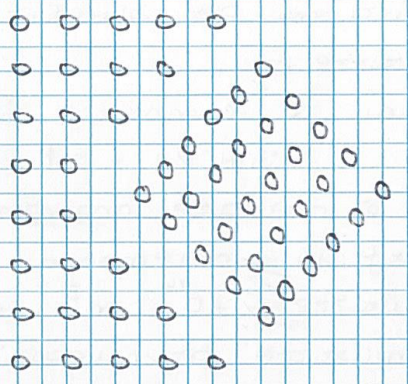


Dislocazione a vite: dovuta allo scivolamento di due piani cristallini uno sull'altro.

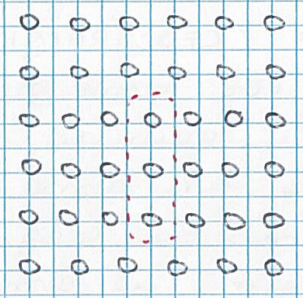
www.alessandropaghi.it

DIFETTI PLANARI

Bordo di grano: [illegible] difetto per materiali con reticolo policristallino. Esempio.

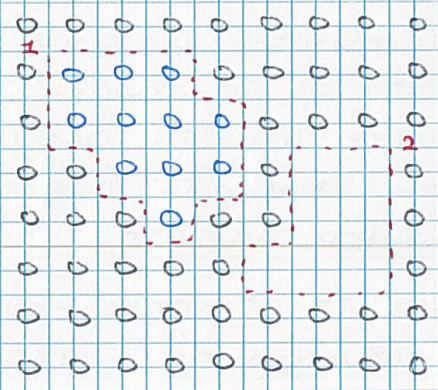


Stacking Fowers: sono difetti di impilamento causati dalla presenza di dislocazioni. Possono assumere interstiziali o vacanze.



DIFETTI DI VOLUME

1) Precipitati di impurezze: volume circoscritto di un vetro materiale con l'interno del silicio.
2) Cavità: raggruppamento di più vacanze.



PURIFICAZIONE DEL SILICIO

Si si ricava dalla quarzite (SiO_2).
A 2000°C si fanno quarzite e carbone:

$$SiO_2 + 2C = Si + 2CO$$

Si ricavato è Si MGS, puro al 98 %.
A questo punto [illegible] si purifica successivamente il Si MGS per distillazione frazionata: si fa bollire il composto ricavando punti diversi di ebollizione per diversi materiali.
A questo punto si fa reagire Si con HCl per formare $SiHCl_3$, quindi si fa una nuova

www.alessandropaghi.it

separazione per distillazione ottenendo $SiHCl_3$ senza impurezze.
Adesso si converte $SiHCl_3$ in Si tramite CVD:

$$2\,SiHCl_3 + 2\,H_2 = 2\,Si + 6\,HCl$$

$6HCl$ è riciclato mentre $2Si$ si deposita sulla superficie, ottenendo come risultato Si EGS, impurezze $< 10^{14}\ cm^{-3}$, che è Si policristallino.
Le impurezze principali sono Ossigeno e Carbonio.

CRESCITA DI MONOCRISTALLI E FABBRICAZIONE WAFER

METODO CZ (CZOCHRALSKI)

Il Silicio EGS viene fuso all'interno di un crogiolo di quarzo e grafite a 1449°C.
Si inserisce un seme di Silicio monocristallino all'interno del crogiolo, ruotando in direzioni per tirarlo: il seme ruota in un verso, mentre il crogiolo nel verso opposto.
Lentamente il seme viene allontanato facendo la crescita di Si monoc. su Si monoc.
Durante questa crescita, alla massa fusa può essere aggiunto drogante, ottenendo un cilindro drogato.

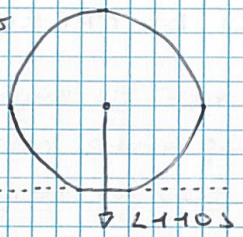
METODO FZ (FLOATING ZONE)

Un cilindro di Si EGS viene lentamente fuso su un seme di Si monoc. andando ad accrescere.
È un processo utilizzato per ottenere cilindri di piccoli diametri e alte resistività.

Una volta ottenuto il cilindro con un metallo, si definisce il diametro attraverso una tornitura della barra.
Successivamente si taglia il cilindro perpendicolarmente all'asse di crescita (1 1 0), orientandolo. Questa operazione è significativa dopo dei "notch".

www.alessandropaghi.it

Si affetta il cilindro ricavando i singoli wafer di spessore 500 ÷ 900 μm.



Lo scarto prodotto da questa operazione è ≈ 30% della dimensione del cilindro iniziale.
Successivamente lo spessore del wafer viene ridotto a ≈ 1 μm tramite una rifinitura meccanica ottenuta per abrasione che migliora la planarità del disco.
Infine si asportano i gradi, si compie un etching chimico per rimuovere il danno meccanico, si rifinisce a specchio la superficie tramite una lappatura meccanico/chimica e si marchia a laser la fetta.

SPECIFICHE COMMERCIALI

- Tipo di drogante
- Concentrazione di drogante come intervallo di resistività
- Orientamento superficie
- Diametro e spessore
- Finitura superficiale:
  - SSP: pulitura singola faccia
  - DSP: pulitura doppia faccia
- TTV: differenza tra min e max spessore
- BOW: distanza del centro da una superficie di riferimento
- WARP: differenza max - min distanza dal piano di riferimento

www.alessandropaghi.it

MODELLI DI CRESCITA, DROGAGGIO CZ

Coefficiente di segregazione K_0: descrive la quantità di drogante nel solido durante la solidificazione del cristallo.

$$K_0 = \frac{C_S}{C_L}$$

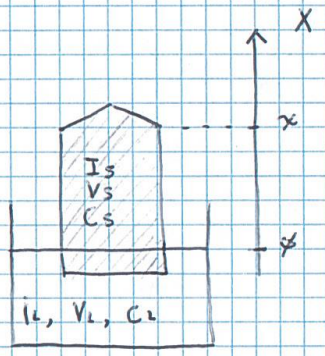
C_S: concentrazione nel solido
C_L: concentrazione nel liquido

K_0 è il valore all'equilibrio termodinamico
$K_0 < 1$: i droganti preferiscono la fase liquida a quella solida: durante la crescita la fase liquida si arricchisce di drogante.
Più corto il cilindro, più il suo drogaggio aumenta.

Modello analitico - matematico:
- unidimensionale (x)
- concentrazione drogante costante nel liquido
- mescolamento di drogante perfetto nel liquido
- Temperatura uniforme
- Equilibrio termodinamico all'interfaccia
- assenza di diffusione nel solido

A: sezione monocristallo
x: lunghezza solidificata
I: numero atomi drogante
V: volume
C: concentrazione drogante

ϕ: iniziale
S: solido
L: liquido



www.alessandropaghi.it

Ad un certo istante t, si giunge ad una certa discesa x: quando una quantità di Si solidifica, un certo numero di atomi di drogante passa dalla fase liquida a quella solida.

$$-dI_L = dI_S = C_S\, dV_S = C_S \cdot A \cdot dx = K_0 \cdot C_L \cdot A \cdot dx$$

$$C_L = \frac{I_L}{V_L} = \frac{I_L}{V_0 - V_S} = \frac{I_L}{A(L-x)}$$

L: lunghezza max che il cilindro può raggiungere.

$$-dI_L = K_0 \cdot \frac{I_L}{A(L-x)} \cdot A \cdot dx = K_0 \cdot \frac{I_L}{L-x}\, dx$$

$$\int_{I_0}^{I_L} \frac{1}{I_L} \cdot dI_L = -K_0 \int_{\phi}^{x} \frac{1}{L-x}\, dx$$

$$\log\left(\frac{I_L}{I_0}\right) = K_0 \log\left(\frac{L-x}{L}\right)$$

$$I_L(x) = I_0 \left(1 - \frac{x}{L}\right)^{K_0}, \quad \text{con } I_L(\phi) = I_\phi$$

$$C_S = \frac{dI_S}{dV_S} = -\frac{dI_L}{A \cdot dx} = -\frac{1}{A}\frac{d}{dx} I_L(x) = -\frac{1}{A} K_0 I_0 \left(-\frac{1}{L}\right)\left(1 - \frac{x}{L}\right)^{K_0 - 1}$$

$$= K_0 \frac{I_0}{V_0}\left(1 - \frac{x}{L}\right)^{K_0 - 1} = K_0 C_0 \left(1 - \frac{x}{L}\right)^{K_0 - 1}$$

Il drogaggio è quindi una funzione crescente di x.

IMPUREZZE NEL PROCESSO CZ

OSSIGENO

Proviene dal quarzo del crogiolo e di posizione generalmente in posizione interstiziale.

L'ossigeno aumenta la resistenza meccanica se in posizione interstiziale, agisce come drogante in concentrazione elevata, può formare precipitati di SiO_2 che a loro volta possono generare stacking faults per via dello stress.

www.alessandropaghi.it

CARBONIO

Possiamo avere drogaggi donatori e di posizione generalmente in posizione sostituzionale.
Il carbonio non influenza il drogaggio, ma altera la formazione di precipitati di ossigeno.

ALTRE IMPUREZZE

Metalli pesanti che influenzano V_{TH} e metalli di transizione che formano livelli profondi nel gap, generando trappole e riducendo tempi di vita medi dei portatori.

GETTERING - CONFINAMENTO DELLE IMPUREZZE

Impurezze metalliche contaminate lontano dalla zona attiva del wafer, sfruttando la loro tendenza ad essere catturate da difetti reticolari estesi.

GETTERING ESTRINSECO

Formazione di una zona danneggiata, danneggiando la parte posteriore della fetta.

GETTERING INTRINSECO

Si utilizzano i precipitati di SiO_2 interni al wafer.
Si sfrutta l'alta mobilità delle impurezze in Si:
i droganti diffondono per lacune mentre le impurezze diffondono come interstiziali.

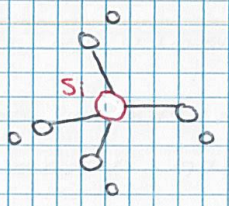
Il ciclo termico è composto da 3 fasi:
1) Esposizione dell'ossigeno superficiale e formazione della zona denudata
2) Formazione di precipitati di SiO_2 esterni
3) Crescita dei precipitati.

www.alessandropaghi.it

OSSIDO DI SILICIO (SiO_2)

Usi di SiO_2:
- dielettrico di gate (O)
- Ossido di campo (O)
- Ossido di PAD nel LOCOS (O)
- Ossido di isolamento nelle trincee (CVD)
- maschera disaggio (O, CVD)
- Strato amorfo durante l'impiantazione ionica (O)
- Dielettrico intermetallico (CVD)
- Strato passivante: strato di dielettrico sopra il circuito integrato per evitare diffusione di inquinanti (CVD)
- Ossido di trincee per memorie flash (O)

Struttura SiO_2:
L'ossido possiede numerose forme cristalline, di cui lo quarzo è la più comune.
Ogni struttura è basata su tetraedri al cui centro ci sono atomi di Si.



L'ossido utilizzato in microelettronica è amorfo.
Per l'ossido termico usuale:
- Densità 2200 kg/m^3
- Densità molecolare $2,3 \cdot 10^{22} cm^{-3}$
- Gap 9 eV
- $\varepsilon_r = 3,9$

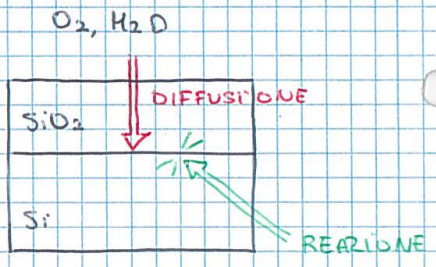
www.alessandropaghi.it

OSSIDAZIONE TERMICA

Principio dell'ossidazione:

In ambiente vengono portate O_2 o H_2O.

La reazione avviene con $T \geq 800°C$.



La specie ossidante diffonde attraverso l'ossido, per via di un gradiente di concentrazione, fino ad arrivare all'interfaccia con Si.

Qui avviene la reazione:

- $Si + O_2 = SiO_2$
- $Si + 2H_2O = SiO_2 + 2H_2$

Nell'ossidazione è associato un aumento di volume:

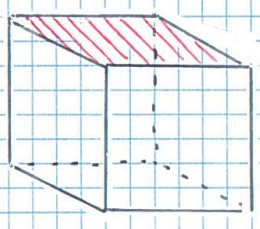
$1\ cm^{-3}$ di Si $\rightarrow$ $5 \cdot 10^{22}$ atomi

$1\ cm^{-3}$ di SiO_2 $\rightarrow$ $2,3 \cdot 10^{23}$ molecole

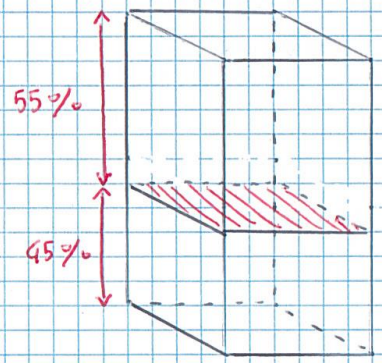
Se si ossida $1\ cm^{-3}$ di Si, il volume aumenta a $2,2\ cm^{-3}$

Spesso l'ossido non è libero di espandersi in tutte le direzioni e quindi l'ossido risultante è sottoposto in compressione.

Via via che si forma ossido, l'interfaccia $Si-SiO_2$ si sposta verso il basso.



$1\ cm^{-3}$ Si



$2,2\ cm^{-3}$ di SiO_2

www.alessandropaghi.it

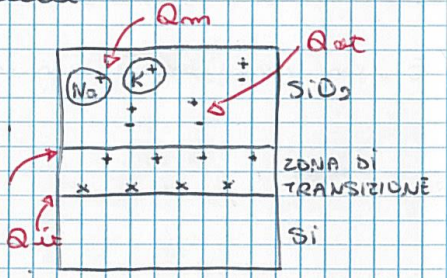
CARICA NELL'OSSIDO

Q_f : carica fissa, dovuta a legami scoperti in prossimità dell'interfaccia $Si - SiO_2$. È positiva.

Q_m : carica mobile è costituita da ioni metallici presenti nell'ossido.

Q_{it} : carica intrappolata all'interfaccia, è carica mobile catturata in uno stato all'interfaccia $Si - SiO_2$.

Q_{ot} : Carica intrappolata nell'ossido, causata da trappole ionizzate e elettroni liberi



FORNO DA OSSIDAZIONE

Costituito da un tubo in quarzo riscaldato in maniera uniforme ($\Delta T \simeq 0{,}5\,^\circ C$) da riscaldatori elettrici che portano la temperatura interna a $800 \div 1200\,^\circ C$.
Le fette vengono introdotte all'interno del forno tramite una navetta in quarzo che può contenere $40 \div 100$ fette.
Il gas viene introdotto tramite degli ugelli di gas esterno.
Nei moderni fornì per un'ossidazione WET si inserisce H_2 ed O_2, non H_2O.
Si inserisce inoltre HCl per ridurre la contaminazione di carica mobile e creare SiO_2 migliore

Velocità di crescita: nm/min.

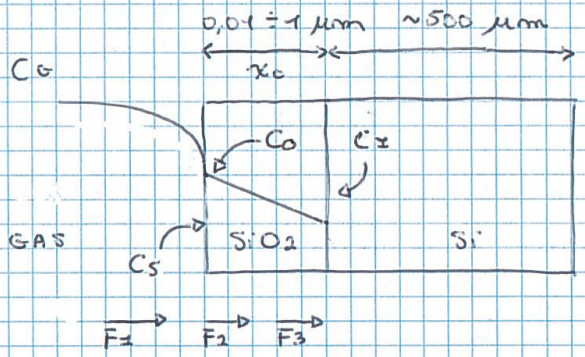
www.alessandropaghi.it

MODELLO DI DEAL E GROVE PER LA CRESCITA DELL'OSSIDO

È un modello lineare - parabolico che usa parametri differenti per le due reazioni di ossidazione:

- DRY: $Si + O_2 = SiO_2$
- WET: $Si + 2H_2O = SiO_2 + 2H_2$

È un modello unidimensionale a stazionario



$[F] = cm^{-2}s^{-1}$

$[C] = cm^{-3}$

F_1: flusso di ossidante attraverso lo strato stagnante

F_2: flusso di ossidante attraverso l'ossido

F_3: flusso di ossidante attraverso la reazione

C_G: concentrazione di ossidante in atmosfera

C_S: concentrazione di ossidante sull'interfaccia atmosfera - ossido cresciuto

C_0: concentrazione di ossidante sull'interfaccia ossido - atmosfera

C_x: concentrazione di ossidante sull'interfaccia SiO_2 - Si.

x_0: spessore SiO_2

La crescita è controllata da 3 fenomeni:

1) Diffusione dell'ossidante dall'atmosfera sulla superficie della fetta

Il gas raggiunge la superficie per diffusione, in quanto in prossimità della fetta è presente uno strato stagnante di atmosfera ferma.

Legge di Trasporto: $F_1 = h_G (C_G - C_S)$

h_G: coefficiente di trasporto.

www.alessandropaghi.it

2) Diffusione dell'ossidante attraverso l'ossido già cresciuto

Legge di Fick: $F_2 = -D \cdot \frac{\partial}{\partial x} C(x,t)$

D: diffusività dell'ossidante nell'ossido.

Integrando: $F_2 = \frac{D}{x_0} (C_0 - C_1)$

3) Reazione chimica di ossidazione dell'interfaccia $Si - SiO_2$

$F_3 = K_s \cdot C_1$

K_s: costante di reazione

Legame $C_0 - C_S$:

$C_0 = H \cdot P_S = H \cdot \frac{m}{V} \cdot KT = H C_S KT$

H: costante di Henry

P_S: pressione parziale dell'ossidante all'interfaccia

m: peso molecolare

V: volume

Legge dei gas perfetti: $P = \frac{m}{V} \cdot KT$

Sperimentalmente P_S non è noto, uso P_G:

$C^* = H \cdot P_G = H \cdot \frac{m}{V} \cdot KT = H C_G KT$

$F_1 = h_G (C_G - C_S) = \frac{h_G}{HKT} (C^* - C_0)$

C^*: concentrazione di ossido nell'ossido se non ci fosse lo strato stagnante.

$h = h_G \cdot \frac{1}{HKT} \rightarrow F_1 = h(C^* - C_0)$

$F_2 = \frac{D}{x_0} (C_0 - C_1)$

$F_3 = K_s C_1$

In condizioni stazionarie $F_1 = F_2 = F_3 = F$

www.alessandropaghi.it

$$F = \frac{C^*}{\frac{1}{h} + \frac{x_0}{D} + \frac{1}{K_S}} \simeq \frac{C_0}{\frac{x_0}{D} + \frac{1}{K_S}}$$

h è molto grande $\rightarrow C^* \simeq C_0$

Questo significa che la differenza di concentrazione $C_0 - C_S$ è piccola.

Velocità di crescita è operato dall'ossido cresciuto:

$$N \cdot A \cdot dx_0 = F \cdot A \cdot dt$$

N: densità molecolare dell'ossido

$N A\, dx_0$: numero molecole di ossido cresciuto

$F A\, dt$: numero molecole di ossigeno consumate

$$v = \frac{d}{dt} x_0 = \frac{F}{N} = \frac{C_0/N}{\frac{x_0}{D} + \frac{1}{K_S}}$$

$$dt = \frac{N}{C_0}\left(\frac{x_0}{D} + \frac{1}{K_S}\right) dx_0$$

$$\int_0^t dt = \int_{x_i}^{x_0} \frac{N}{C_0}\left(\frac{x_0}{D} + \frac{1}{K_S}\right) dx_0$$

$$t = \frac{N}{2C_0 D}\left(x_0^2 - x_i^2\right) + \frac{N}{C_0 K_S}\left(x_0 - x_i\right)$$

Scritta mente la si indica così:

$$t + \tau = \frac{x_0^2}{B} + \frac{x_0}{B/A}$$

$$B = \frac{2C_0 D}{N} \; ; \quad \frac{B}{A} = \frac{C_0 K_S}{N} \; ; \quad \tau = \frac{x_i^2}{B} + \frac{x_i}{B/A}$$

$$v = \frac{d}{dt} x_0 = \frac{C_0/N}{\frac{x_0}{D} + \frac{1}{K_S}} = \frac{2DC_0/N}{2x_0 + 2\frac{D}{K_S}} = \frac{B}{2x_0 + A}$$

$v \propto x_0^{-1}$: più cresce l'ossido, più la velocità di crescita diminuisce

$x_0 \rightarrow \infty$, $v \rightarrow 0$

www.alessandropaghi.it

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

Im tempi brevi la crescita è limitata dalla reazione, ed il regime è lineare:

$\frac{t+\tau}{A^2/4B} \ll 1$, sviluppo in serie di Taylor 1° ordine

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

Per tempi lunghi la crescita è limitata dalla diffusione nell'ossido, ed il regime è parabolico

$\frac{t+\tau}{A^2/4B} \gg 1$, $\sqrt{\frac{t+\tau}{A^2/4B}} \gg 1$

$$x_0 \simeq \frac{A}{2}\sqrt{\frac{t+\tau}{A^2/4B}} = \sqrt{B(t+\tau)}$$

B, $\frac{B}{A}$ hanno una dipendenza dalla temperatura di tipo Arrhenius:

$$B = C_1 \exp\left(-\frac{E_1}{kT}\right)$$

$$\frac{B}{A} = C_2 \exp\left(-\frac{E_2}{kT}\right)$$

$\frac{B}{A}$ dipende molto dall'orientazione del substrato

B, $\frac{B}{A}$ dipendono dalla pressione parziale di ossidante

$$B = B_0\left(\frac{P}{P_0}\right)^m \qquad P_0: \text{ pressione di riferimento}$$

$$\frac{B}{A} = \left(\frac{B}{A}\right)_0\left(\frac{P}{P_0}\right)^m$$

WET: $m = 1$

DRY: $m = 0{,}7 \div 0{,}8$

$\frac{B}{A}$ dipende dal drogaggio del substrato, in quanto è legato alla concentrazione di vacanze che aumenta con l'aumentare della concentrazione di drogante.

www.alessandropaghi.it

$$\frac{B}{A} = \left(\frac{B}{A}\right)_i \cdot \left[1 + 2{,}62 \cdot 10^{3} \exp\left(-\frac{1{,}1\ eV}{KT}\right)\left(\frac{Cv}{Cv_i} - 1\right)\right]$$

$\left(\frac{B}{A}\right)_i = \left(\frac{B}{A}\right)$ semiconduttore intrinseco

Il modello di Deal e Grove non prevede correttamente la velocità di crescita per ossidi sottili dry, $x_0 < 20$ nm.

Se si è interessati ad ossidi dry, $x_0 > 20$ nm si può introdurre un fattore che tenga la caratteristica (x_0, t) indietro, riproducendo correttamente la curva per questo tipo di ossidazione.

MODELLO DI MASSOUD PER OSSIDI SOTTILI

Fornisce un termine correttivo alla velocità di crescita:

$$\frac{d}{dt} x_0 = \frac{B}{2x_0 + A} + C \cdot \exp\left(-\frac{x_0}{L}\right)$$

$$C = C_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{KT}\right)$$

$L = 7$ nm

Se $x_0 > 4L$, usiamo il modello Deal Grove.

www.alessandropaghi.it

CREAZIONE DI STRATI DROGATI

La creazione di uno strato drogato è costituita da due fasi:

1) Inserimento di una dose di drogante controllata in specifiche zone del substrato mediante diffusione termica (PREDISPOSIZIONE) o impiantazione ionica;
2) Diffusione termica all'interno del substrato per raggiungere la profondità di giunzione finale (DRIVE in);

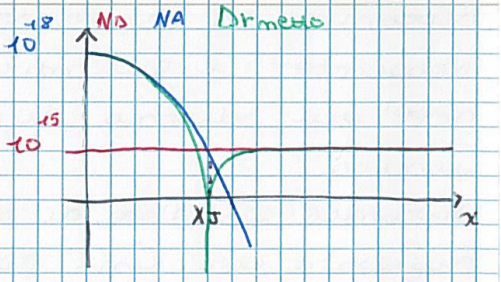
Scelta dei dispositivi comporta:

- profondità di giunzione minima;
- concentrazione di drogante maggiore;

in modo che ρ_S, resistenza di strato, non aumenti

$$\rho_S = \frac{1}{\sigma\, x_j} = \frac{1}{q\,\mu_m N_D\, x_j}$$

x_j: profondità di giunzione, profondità alla quale la drogaggio raggiunge il drogaggio del substrato.



Parametri di progetto:

- Resistenza di strato;
- Profondità di giunzione;
- concentrazione di drogante superficiale;

Dose: $Q_B = \int_0^{+\infty} N_A(x)\,dx$: drogaggio / unità di superficie.

www.alessandropaghi.it

DIFFUSIONE TERMICA

PREDEPOSIZIONE E DRIVE IN

La fetta viene inserita in forno, le quali contiene la sorgente del drogante nelle stadio gassoso.

Le precursore del drogante si scompone sulla superficie della fetta, liberando atomi di drogante che diffondono all'interno della fetta per via di un gradiente di concentrazione.

L'atmosfera è carica di precursore da una quantità che supera la solubilità solida del semiconduttore (max quantità di drogante che può penetrare attraverso il semiconduttore stesso).

Per motivi di riproducibilità, la concentrazione all'interfaccia Sorgente - Wafer è la solubilità solida del drogante nel silicio.

La superficie ha dunque un drogaggio eccessivo rispetto a quello richiesto, ma ciò è necessario per passare alla fase di drive in che prevede l'impostazione del drogante in profondità all'interno del Si.

Durante la predeposizione ho un gas molto drogante, e quindi una fase gassosa dello stesso nell'ambiente esterno da una parte e l'impiantazione ionica.

Durante la fase di drive in, la fetta viene ossidata con uno strato di SiO_2 per evitare che nuovo drogante diffonda verso il wafer, oppure che drogante già presente nella fetta diffonda in atmosfera.

www.alessandropaghi.it

EQUAZIONI DELLA DIFFUSIONE

Si ritiene un modello unidimensionale.

F: flusso di droghante

D: coefficiente di diffusione

C: concentrazione di droghante

Prima legge di Fick: $F(x,t) = -D \cdot \frac{\partial}{\partial x} C(x,t)$

Si traduce dicendo che il flusso è proporzionale al gradiente di concentrazione.

Conservazione del droghante:

$$[F(x,t) - F(x+\Delta x, t)] A \Delta t = \Delta C A \Delta x$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} F(x,t) \Delta x \Delta t = \Delta C \Delta x$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} F(x,t) = \frac{\partial}{\partial t} C(x,t)$$

La variazione di flusso è proporzionale alla variazione di concentrazione.

$$\frac{\partial}{\partial x} F(x,t) = -\frac{\partial}{\partial x}\left[D \cdot \frac{\partial}{\partial x} C(x,t)\right]$$

$$\frac{\partial}{\partial t} C(x,t) = \frac{\partial}{\partial x}\left[D \cdot \frac{\partial}{\partial x} C(x,t)\right] = D \frac{\partial^2}{\partial x^2} C(x,t)$$

Se D non dipende da x.

Seconda legge di Fick: $\frac{\partial}{\partial t} C(x,t) = D \cdot \frac{\partial^2}{\partial x^2} C(x,t)$

Soluzioni dell'equazione:

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

è la curva gaussiana.

Soddisfa le condizioni al contorno:

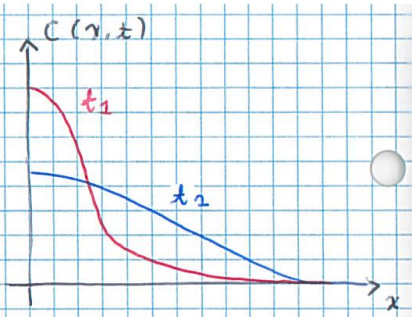
$$\begin{cases} \int_{\emptyset}^{+\infty} C(x,t)\, dx = Q \\ \lim_{t \to \emptyset^+} C(x,t) = 2Q\,\delta(x) \end{cases}$$

$$F(x,t) = -D \cdot \frac{\partial}{\partial x} C(x,t) = \frac{x}{2t} C(x,t) \quad ; \quad F(\emptyset,t) = \emptyset$$

www.alessandropaghi.it

Questa distribuzione è un esempio modello per la fase di DRIVE IN.

Se fosse nell'intorno della superficie nulla, ciò impedirebbe il flusso di drogante.



$t_2 > t_1$

Dalle equazioni risulta che $\sigma_c^2 \propto t$

più i tempi aumentano e più la gaussiana si allarga generando una redistribuzione di drogante nel silicio.

Grazie alle due condizioni al contorno, si considera di mantenere costante la dose Q totale, che diffonde nel silicio partendo da una concentrazione di drogante iniziale 2Q complanata in uno spessore $\delta(x)$ di spessore, ovvero sulla superficie.

$$C(x,t) = C_S \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

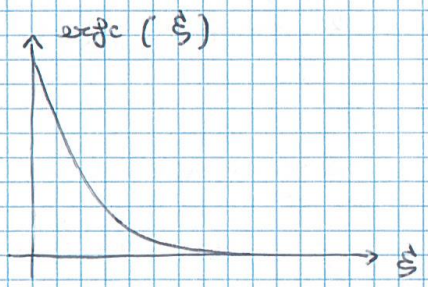
$$\operatorname{erfc}(\xi) = 1 - \operatorname{erf}(\xi) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\xi} \exp(-\eta^2)\, d\eta$$

$\operatorname{erfc}(\xi)$: funzione degli errori complementata.

$\operatorname{erf}(\xi)$ è una primitiva della gaussiana

Soddisfa le condizioni al contorno:

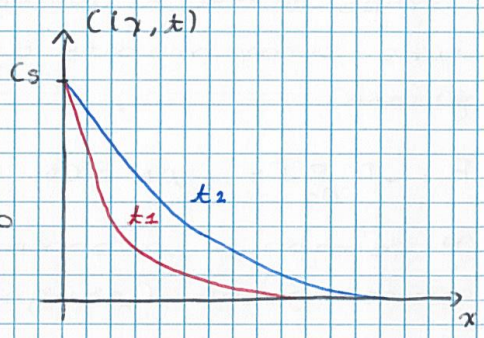
$$\begin{cases} Q = \int_0^{+\infty} C(x,t)\, dx = \dfrac{2 C_S}{\sqrt{\pi}} \sqrt{Dt} \\ \lim_{t \to 0^+} C(x,t) = \begin{cases} C_S & , x = 0 \\ 0 & , x > 0 \end{cases} \end{cases}$$



www.alessandropaghi.it

$$F(x,t) = -D \frac{\partial}{\partial x} C(x,t) = D \frac{C_S}{\sqrt{\pi D t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

Questa soluzione è un buon modello per la fase di predeposizione



Dalle condizioni al contorno vuota che la quantità di drogante all'interno del Si aumenta col tempo e che la concentrazione all'interfaccia è costante ed uguale a Cs.

DIFFUSIVITA'

Per i semiconduttori intrinseci, alla temperatura di diffusione, la diffusività può ottenersi in forma di Arrhenius:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_A}{KT}\right)$$

n_i: concentrazione intrinseca di portatori

$$n_i = 3,1 \cdot 10^{16} T^{3/2} \exp\left(-\frac{0,603\ eV}{KT}\right) cm^{-3}$$

Superata una certa temperatura un materiale si comporta come intrinseco, non influiscono eventuali drogaggi.



Sperimentalmente queste assunzioni non giustificano i risultati sperimentali: la diffusività effettiva è maggiore di quella intrinseca.

www.alessandropaghi.it

EFFETTO DEL CAMPO

Un primo effetto è dovuto alla presenza di un campo elettrico esterno $\mathcal{E}$, che induce una componente di drift nella densità di corrente.

$$F = -D \frac{\partial}{\partial x} C_D + \mu_D \mathcal{E} C_D$$

Il campo è prodotto dalla ricombinazione tra carica fissa (drogante) e carica mobile.

I droganti n perdono un elettrone e assumo $Q > 0$.
I droganti p assumono un elettrone e diventano carichi con $Q < 0$.
Gli atomi di drogante contribuiscono alla conduzione elettrica ma no.

Ma elettroni e ioni contribuiscono alla diffusione in maniera diversa: gli elettroni diffondono molto più velocemente e questo crea una separazione tra carica negativa o positiva, giustificando la presenza di un campo elettrico $\mathcal{E}$.

$$\mathcal{E} = -\frac{\partial}{\partial x} \psi_s = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{KT}{q} \ln \left(\frac{n}{n_i} \right) \right)$$

ψ_s: potenziale elettrico

$$F = -D \frac{\partial}{\partial x} C_D - \mu_D C_D \frac{KT}{q} \frac{\partial}{\partial x} \ln \left(\frac{n}{n_i} \right)$$

$$= -D \left[\frac{\partial}{\partial x} C_D + C_D \frac{\partial}{\partial x} \ln \left(\frac{n}{n_i} \right) \right]$$

$$n = C_D + p = C_D + \frac{n_i^2}{n} \rightarrow n = \frac{C_D + \sqrt{C_D^2 + 4n_i^2}}{2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \ln \left(\frac{n}{n_i} \right) = \frac{1}{\sqrt{C_D^2 + 4n_i^2}} \cdot \frac{\partial}{\partial x} C_D$$

$$F = -D \left[1 + \frac{C_D}{\sqrt{C_D^2 + 4n_i^2}} \right] \frac{\partial}{\partial x} C_D$$

www.alessandropaghi.it

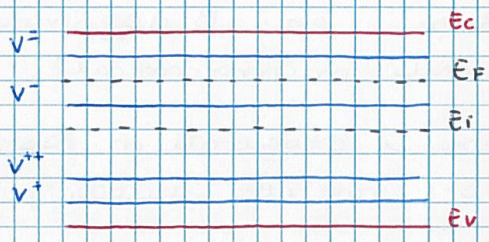
La diffusività è dunque funzione dei drogaggi

MECCANISMI MACROSCOPICI

La diffusività è assoluta da difetti di punto.
La concentrazione di vacanze e interstiziali è funzione della temperatura e del drogaggio.

Le vacanze possono assumere vari stati di carica, a ciascuno dei quali è associato un livello di energia all'interno del gap.
In condizioni intrinseche ($E_F = E_i$), lo stato di carico predominante è quello neutro.

Se $E_F > E_i$:



V^-: vacanza carica negativamente 1 volta.
$V^=$: vacanza carica negativamente 2 volte.
...

Le vacanze con carica negativa V^- saranno pertanto:

$$C_{V^-} = C_{V_0} \exp\left(\frac{E_F - E_{V^-}}{KT}\right)$$

C_{V^-}: concentrazione V^-
C_{V_0}: concentrazione vacanze neutre

$$C_{V_0} = 9 \cdot 10^{23} \exp\left(-\frac{2,6\ eV}{KT}\right) cm^{-3}$$

$$C_{V^-} = C_{V_0} \exp\left(\frac{E_F - E_i + E_i - E_{V^-}}{KT}\right) = C_{V_i^-} \exp\left(\frac{E_F - E_i}{KT}\right)$$

$$C_{V^-} = C_{V_i^-} \frac{n}{n_i} \quad ; \quad C_{V^=} = C_{V_i^=} \left(\frac{n}{n_i}\right)^2$$

Una conclusione valuta:

$$D = D^0 + D^- \left(\frac{n}{n_i}\right) + D^= \left(\frac{n}{n_i}\right)^2$$

$$D^0 = D_0 \exp\left(-\frac{E_A}{KT}\right)$$

www.alessandropaghi.it

D^0, D^-, $D^=$ di tipo Arrhenius

Per un semiconduttore p invece:

$$D = D^0 + D^+ \left(\frac{p}{n_i}\right) + D^{++} \left(\frac{p}{n_i}\right)^2$$

EFFETTI DELL'OSSIDAZIONE

Durante un'ossidazione la fisica della diffusione è alterata.
L'ossidazione riduce la concentrazione di vacanze ed incrementa quella di interstiziali.
Questo fenomeno ha effetti diversi su droganti diversi: es: B diffonde maggiormente e Sb diffonde minormente.

Inoltre i droganti si depositano preferenzialmente in Si, mentre quelli p in SiO_2

È da aggiungere che lo strato di ossido non funge da tappo perfetto e ciò altera ulteriormente il profilo del drogante.

APPARATI PER LA DIFFUSIONE TERMICA

Sono impiegati degli apparati per ossidazione con l'inserimento di specifici precursori:

- B_2H_6 per B;
- PH_3 per P;
- AsH_3 per As;

Forni rapidi RTA minimizzano il budget termico.

www.alessandropaghi.it

IMPIANTAZIONE IONICA

metodo per inserire drogante nel substrato in quantità controllate.
Si colpisce il substrato con ioni del drogante accelerati ad alta energia (10 KeV ÷ 1 MeV).
Gli ioni penetrano nel substrato e si fermano dopo aver ceduto la loro energia nel suo reticolo.

PRO:
- temperatura ambiente
- controllo accurato della dose
- controllo della profondità
- mascheramento con fotoresist

CONTRO:
- processo seriale
- danneggiamento struttura cristallina
- necessità di vuoto
- costo apparecchiatura

PROFILI DI IMPIANTAZIONE

Il profilo di impianto non è un profilo di drogaggio perché gli ioni non si trovano in posizioni sostituzionali

Utilizziamo modelli empirici e monodimensionali.
Gli ioni nel substrato rallentano a causa di urti successivi distribuiti casualmente, dunque la distribuzione di atomi impiantati ha natura statistica.

C: Profilo di impianto

Dose: $Q = \int_{\varnothing}^{+\infty} C(x)\,dx$

Range proiettato: $R_p = \frac{1}{Q}\int_{\varnothing}^{+\infty} x\,C(x)\,dx$

È il valor medio della distribuzione, ovvero

www.alessandropaghi.it

la profondità media a cui arriva uno ione.

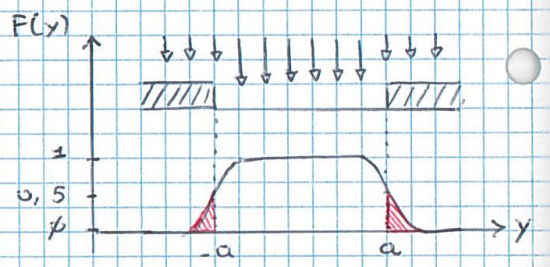
Deviazione Standard: $\Delta R_p = \sqrt{\frac{1}{Q}\int_{-\infty}^{+\infty} (x - R_p)^2 C(x)\, dx}$

Facciamo una stima di quanto la distribuzione di accettori

R_p, ΔR_p ↓ se m_{IONE} ↑
R_p, ΔR_p ↑ se E_{IONE} ↑

a parità di energia, R_p si trova più in profondità più la massa dello ione è ridotta.

A causa dello scattering laterale dei atomi, una parte di essi si ferma sia di sotto della maschera.



ΔR_1: deviazione standard del profilo in direzione ortogonale alla direzione di emissione degli ioni

Profilo bidimensionale:

$C(x,y) \otimes f_m(y)$

$f_m = \begin{cases} 1 & \text{se maschera aperta} \\ 0 & \text{se maschera chiusa} \end{cases}$

f_m: funzione di maschera

$\otimes$: operatore di convoluzione.

Profilo di impianto Gaussiano:

$$C(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\,\Delta R_p} \exp\left(-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right)$$

la differenza tra drive in, non avere traslazione $\overline{C(x,t)} = 0$, devi ottenere $\overline{C(x)} = R_p$.

www.alessandropaghi.it

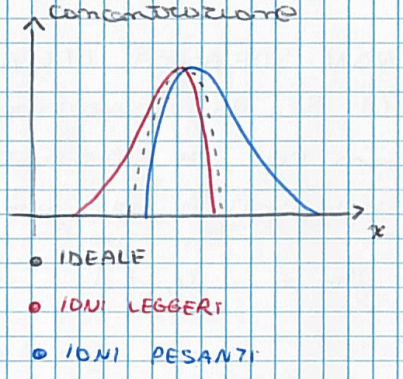
$C(x)$ ha senso solo per $x > 0$. Un'interpretazione di $C(x)$, per $x < 0$, può essere data dagli ioni backscattered durante l'impiantazione.

Profilo di impianto gaussiano:

$$C(x,y) = C(x) \exp\left[-\frac{y^2}{2\Delta R_\perp^2}\right]$$

La gaussiana è una distribuzione che approssima in maniera accettabile il profilo di impianto nel caso di substrato amorfo.

A causa del backscattering i profili reali sono asimmetrici: aumenta la concentrazione del profilo verso la superficie a causa di ioni leggeri, ed in profondità a causa di ioni pesanti.



Si misurano i momenti superiori della distribuzione:

asimmetria: $\gamma = \frac{1}{Q\Delta R_p^3} \int_0^{+\infty} (x - R_p)^3 C(x)\, dx$

curtosi: $\beta = \frac{1}{Q\Delta R_p^4} \int_0^{+\infty} (x - R_p)^4 C(x)\, dx$

↳ Indica quanto è piatta la curva in prossimità del massimo della distribuzione

Per una gaussiana: $\gamma = 1$, $\beta = 3$.

Per queste motivazioni si usa la distribuzione Pearson IV:

$$\alpha \frac{\left|\frac{\Gamma\left(m + \frac{iv}{2}\right)}{\Gamma(m)}\right|^2}{B\left(m - \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right)} \left(\frac{x(b_2 x + b_1) + b_0}{x^2 b_2}\right)^{-m} \exp\left[-m \cdot \arctan\left(\frac{2b_2 x + b_1}{a b_2}\right)\right]$$

www.alessandropaghi.it

MASCHERE PER L'IMPIANTO

Il materiale usato come maschera deve avere range proiettato molto minore di quello di Si: ecco perché si usano Fotoresist (polimeri fotosensibili) e metalli invece che SiO_2.

$C^*(x_m)$: drogaggio della maschera all'interfaccia maschera/Si

C_B: drogaggio del substrato.

$$C^*(x_m) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\,\Delta R_p^*} \exp\left[-\frac{(x_m - R_p^*)^2}{2\,\Delta R_p^{*2}}\right] \leq C_B$$

NON IDEALITÀ DELLA MASCHERA NELL'IMPIANTO LATERALE

1) Se la maschera ha spessore notevole, nel punto in cui si assottiglia di più, una maggiore quantità di ioni raggiunge Si:

$f_m \in [0, 1]$



2) In caso di impianto inclinato, lo spessore di maschera vista dal fascio è inferiore a quello totale. Nei MOSFET, spesso questa circostanza per creare comodi retrocorti.

CHANNELLING

A causa di questo fenomeno, che avviene nei materiali cristallini, è possibile che alcuni ioni raggiungano profondità elevate infilandosi nei canali tra gli atomi di Si. Se profili di impianto vanno molto significativamente. Questo fenomeno viene modellato empiricamente come la somma di due Pearson.

Per ridurlo, l'amorfizzazione del wafer durante l'impiantazione riduce questo fenomeno

www.alessandropaghi.it

Per ridurre il channeling è possibile impiantare attraverso un sottile strato amorfo e con una dose inferiore.

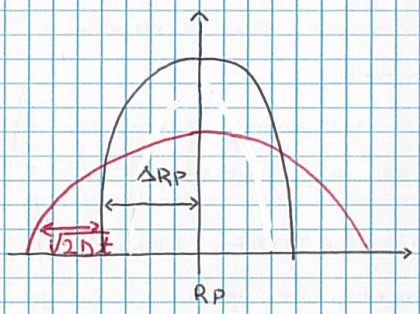
DIFFUSIONE DEL DROGANTE IMPIANTATO

Un profilo gaussiano sottoposto a trattamento termico rimane gaussiano.

Le variazioni di due processi sono additive:

$$C(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\,\Delta R} \exp\left(-\frac{(x-R_P)^2}{2\Delta R^2}\right)$$

$$\Delta R^2 = \Delta R_P^2 + 2D_1 t_1 + 2D_2 t_2 + \dots$$



- IMPIANTO
- PASSO TERMICO

MECCANISMI DI FRENAMENTO E DANNEGGIAMENTO DEL CRISTALLO

$\frac{dE}{dx}$: perdita di energia per unità di lunghezza

S_n: frenamento nucleare, provoca un danneggiamento reticolo a causa di urti.

S_e: frenamento elettronico, è dovuto alle cessioni di energia agli atomi si attraversano in contatto con gli elettroni atomici.

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

$S_e \propto \sqrt{E}$

S_n raggiunge un massimo (che dipende dal tipo di ione) e poi diminuisce.

Se dopo un reticolo ricristallizzato è contaminato dove è prevalentemente il frenamento nucleare e può essere sufficiente ad amorfizzare completamente il bulk

www.alessandropaghi.it

Un ANNEALING recupera rapidamente i difetti di punto, ma per densità elevate di difetti si possono formare dislocazioni stabili. Per essere eliminate è necessario un passo termico a temperature elevate che causa ridiffusione del drogante.
Per strati amorfizzati l'annealing effettua una ricristallizzazione: le zone precedentemente cristalline servono da materiale di ricombinazione per zone amorfe.
L'annealing deve essere ottenuto velocemente da due impiantate.

IMPIANTATORE IONICO

Costituito da:
- Sorgente di ioni
- Filtro analizzatore
- acceleratore
- fuoco
- deflettore
- puntatore X & Y

La sorgente ionica (compressa) è una sorgente con precursore del materiale, e una camera di ionizzazione con elettroni a bassa pressione. Si generano ioni di specie diverse, accelerati e selezionati dal filtro magnetico a seconda di $\frac{m}{q}$:

Forza di Lorentz: $m v^2/R = q v B$

Forza centripeta: $\frac{1}{2} m v^2 = E = q \cdot V \rightarrow v = \sqrt{\frac{2qV}{m}}$

r: raggio di curvatura $= \frac{1}{B}\sqrt{2V\frac{m}{q}}$

Se fascio viene poi accelerato dall'energia di impianto, focalizzato, deflesso per eliminare i neutri e scandito sulla fetta. La dose viene decisa dalla corrente di neutralizzazione.

www.alessandropaghi.it

DEPOSIZIONE DI FILM SOTTILI

CARATTERISTICHE

CONFORMITÀ

Un film è conforme se ha la stessa geometria della superficie originaria con spessore costante.



RIEMPIMENTO

Un film riempie in maniera corretta una geometria se copre in maniera uguale tutte le superfici evitando la creazione di cavità



PLANARITÀ

Un film è planare se la superficie esposta giace sullo stesso piano



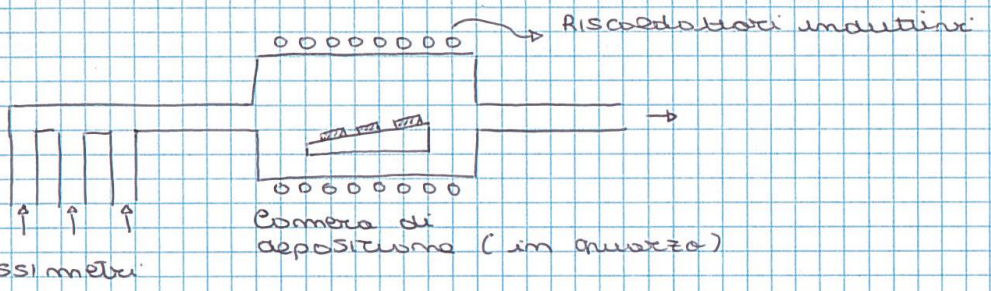
CVD, DEPOSIZIONE CHIMICA DA FASE VAPORE

Se film viene depositato in conseguenza di una reazione chimica che avviene sulla superficie della fetta con reagenti introdotti nella camera di deposizione in forma gassosa.
È comunemente usata per depositare silicio monocristallino, policristallino, dielettrici come nitruro di silicio, elementi metallici come tungsteno.
Dà un film di buona qualità chimica, elettrica, meccanica e fisica, conforme con buona copertura dei gradini.

www.alessandropaghi.it

È tuttavia possibile che il film risultante possa essere soggetto ad uno stress residuo.

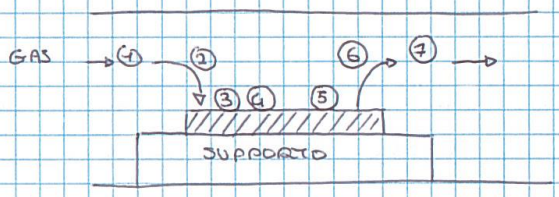
APCVD, CVD A PRESSIONE ATMOSFERICA



A differenza dei forni per ossidazioni, nella camera di deposizione viene accolta esclusivamente la supporto di grafite su cui appoggiano i wafer, in quanto vogliamo che la reazione chimica avvenga soltanto sulla superficie delle fette.

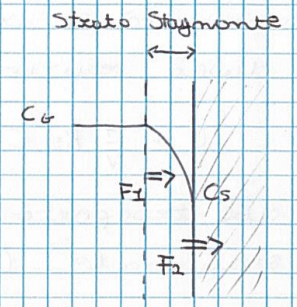
Fasi del processo:

1) Trasporto reagenti nel reattore
2) diffusione reagente attraverso lo strato stagnante
3) Formazione di un legame debole con le molecole della superficie del wafer
4) Diffusione delle molecole legate → decomposizione → reazione
5) Allontanamento delle componenti non gradite dalla superficie dei wafer
6) Diffusione di queste componenti verso la zona di convezione
7) Trasporto dei prodotti di reazione



www.alessandropaghi.it

MODELLO DI CRESCITA



F_1: flusso di reagente attraverso lo strato stagnante

F_2: flusso di reagente consumato dalla reazione

C_G: concentrazione di reagente nel reattore

C_S: Concentrazione di reagente sulla superficie della lista.

Trasporto nello strato stagnante:

$$F_1 = h_G (C_G - C_S)$$

h_G: coefficiente di trasporto

Reazione all'interfaccia:

$$F_2 = K_S C_S$$

K_S: costante di reazione

In condizioni stazionarie: $F_1 = F_2 = F$

$$C_S = \frac{h_G}{K_S + h_G} \cdot C_G$$

$$F = K_S \cdot C_S = \frac{K_S h_G}{K_S + h_G} \cdot C_G$$

v: velocità di crescita

Supponiamo che 1 molecola di reagente dei 1 molecola di film:

$$v = \frac{F}{N} = \frac{1}{N} \cdot \frac{K_S h_G}{K_S + h_G} C_G$$

N: densità molecolare del film cristallo

$K_S \propto e^{-E/kT}$; $h_G \propto T^{1,5 \div 2}$

www.alessandropaghi.it

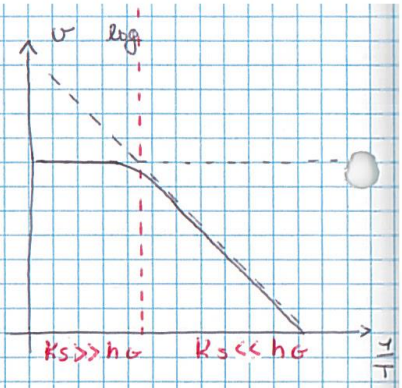
La velocità di crescita è controllata:

- dalla reazione ($K_S \ll h_G$)

$$v \simeq \frac{1}{N} K_S C_G$$

- dal trasporto nello strato stagnante ($K_S \gg h_G$)

$$v \simeq \frac{1}{N} h_G C_G$$



Da sottolineare che la operazione dello strato stagnante e la concentrazione di precursori non sono costanti, quindi C_G e h_G diminuiscono lungo il reattore. In particolare la operazione dello strato stagnante aumenta lungo il reattore.

Ad alta temperatura, $K_S \gg h_G$, e la velocità è controllata dal flusso.
Le fette devono essere posizionate sul piano del recettore, che rischierà essere incrinato per compensare l'aumento dello strato stagnante.
Ottengo una velocità di reazione maggiore ma con capacità minore.

A bassa temperatura, $K_S \ll h_G$, e la velocità è controllata dalla reazione.
Le fette devono essere posizionate verticalmente rispetto al piano del recettore.
Ottengo una velocità di reazione minore ma con capacità maggiore.
Il problema è che v dipende esponenzialmente da T.

www.alessandropaghi.it