

Scopo della lezione:

Presentare una rassegna dei metodi usati per introdurre, in modo controllato, delle impurita' nei materiali usati in microelettronica

In particolare verranno discussi:

- *Semiconduttori intrinseci ed estrinseci*
- *Conducibilita' dei materiali*
- *Conversione di tipo di droganti*
- *Diffusione atomica*
- *Impiantazione ionica*

Semiconduttori intrinseci

Sono materiali che hanno un Band Gap piuttosto stretto (cioe' tale da poter essere superato con la sola energia termica, $\leq 2\text{eV}$). A bassa T , sono isolanti; innalzando T , cominciano a condurre.

Semiconduttore	Ge	Si	GaAs
$E_g(\text{eV})$	0.66	1.12	1.42
$n_i(300\text{ }^\circ\text{K})$	$2.4 \cdot 10^{19}$	$1.45 \cdot 10^{16}$	$1.79 \cdot 10^{12}$

A temperatura T , nei semiconduttori intrinseci :

$$n = p = n_i = G \exp[-E_g/2kT]$$

da cui:

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$$

$$\sigma = n_i q (\mu_n + \mu_p) = q (\mu_n + \mu_p) G e^{-E_g/2kT}$$

$$\ln \sigma = \text{cost} - E_g / 2kT$$

Si e' cosi' trovato un metodo sperimentale per misurare E_g

Semiconduttori estrinseci

Le caratteristiche di conducibilità sono causate dall'inserimento di atomi di impurezze al posto di atomi del reticolo. Drogaggio di tipo n (dove i portatori di maggioranza sono elettroni) e' conferito dall'aggiunta di atomi pentavalente detti donori, mentre drogaggio di tipo p (in cui i portatori di maggioranza sono lacune) e' conferito dall'aggiunta di atomi trivalenti, detti accettori.

- esempio: drogaggio con N_d atomi donori.

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p \approx N_dq\mu_n + 0$$

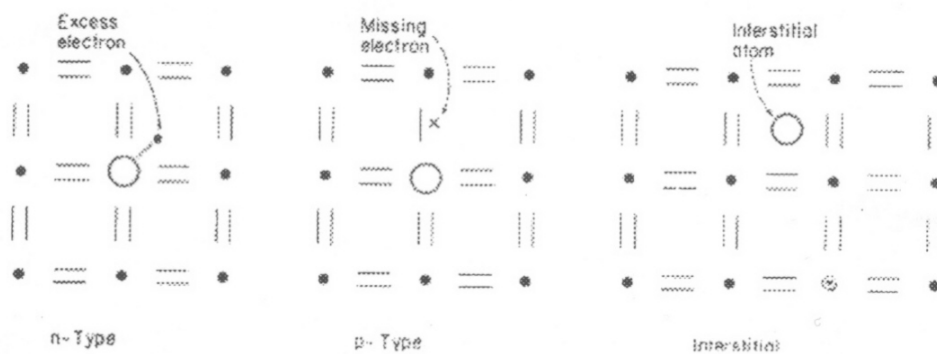
$$pn = n_i^2$$

$$n = N_d$$

$$\Rightarrow p = n_i^2 / N_d$$

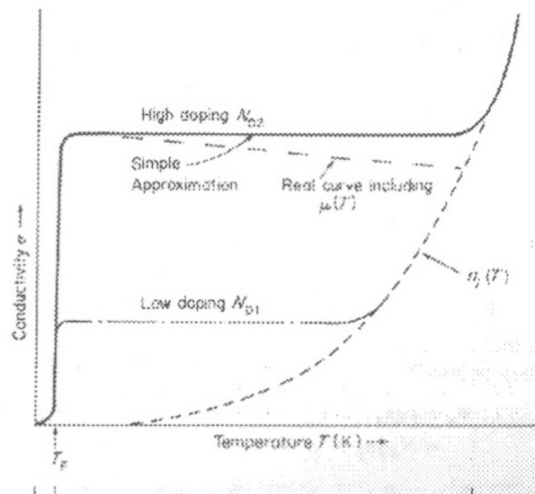
Drogaggio

-4-



Dipendenza della conducibilita' dalla temperatura: aggiunta di impurita' \Rightarrow aggiunta di livelli elettronici vicini rispettivamente alla banda di conduzione (tipo n) o alla banda di valenza (tipo p) e \Rightarrow (se T e' sufficiente) salto dai livelli alle rispettive bande.

C'e' una temperatura critica T_f al di sotto della quale i portatori sono "congelati" e la conducibilita' e' nulla. Al di sopra di T_f , la conducibilita' e' circa costante fino a che la T e' tanto alta che n_i (fortemente dipendente da T) supera N_d . Allora la conducibilita' aumenta e il materiale ridiventa intrinseco. Se ci sono sia N_d che N_a , l'aumento della temperatura fa si che elettroni e lacune diventino disponibili alla conduzione ma contemporaneamente aumenta la probabilita' di ricombinazione.



Il contributo netto alla conduzione e' dato da $|Nd-Na|$ e si possono avere tre situazioni differenti:

- 1) $Nd > Na$ --> semiconduttore estrinseco di tipo n*
- 2) $Na > Nd$ --> semiconduttore estrinseco di tipo p*
- 3) $Na = Nd$ --> semiconduttore intrinseco (compensato)*

In realta' un aumento dei droganti provoca delle variazioni nella mobilita' dei portatori (dipendente da $(Nd + Na)$).

➡ intrinseco \neq compensato

Conversione di tipo

Talvolta puo' essere necessario realizzare delle zone di tipo p all'interno di un substrato n o viceversa. La conversione si puo' ottenere in svariati modi:

- direttamente all'atto della crescita del cristallo (generalmente miscelando dei droganti nel semiconduttore allo stato liquido)*
- diffusione atomica*
- impiantazione ionica*

Si preferisce normalmente ricorrere agli ultimi due metodi piuttosto che al primo che non fornisce garanzie in termini di controllo di processo.

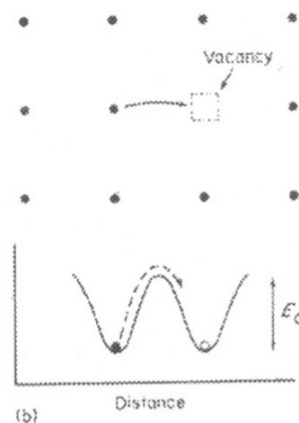
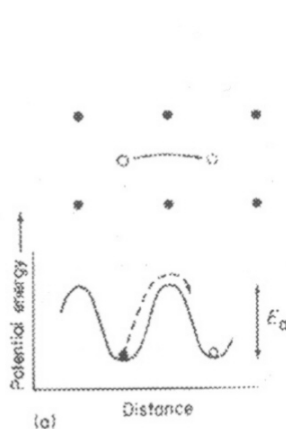
Diffusione atomica

Le condizioni essenziali per ottenere diffusione sono:

- la presenza di un gradiente di concentrazione degli atomi
- energia termica sufficiente per provocare il moto degli atomi nel materiale.

Ci sono due tipi di diffusione:

- diffusione interstiziale
- diffusione sostituzionale.



Diffusione

In entrambi i casi occorre fornire all'atomo fermo in una posizione di equilibrio un'energia di attivazione E_a che gli consenta di superare l'energia potenziale che lo confina nella sua posizione di partenza. Secondo Boltzmann, la probabilita' che l'atomo abbia tale energia e' data da $e^{-E_a/kT}$. Nel caso della diffusione sostituzionale occorre tenere conto anche del fatto che affinche' la diffusione possa avvenire, l'atomo che si muove deve trovare un sito libero nel reticolo in cui spostarsi. Se non ci fosse anche un gradiente di concentrazione il processo fin qui descritto sarebbe del tipo moto casuale e darebbe luogo a frequenze di salto estremamente basse. Se invece viene a crearsi anche un gradiente di concentrazione, il processo puo' essere descritto dalle leggi della diffusione di Fick:

$$\phi = -D(dN/dx)$$

$$(dN/dt) = D(d^2N/dx^2)$$

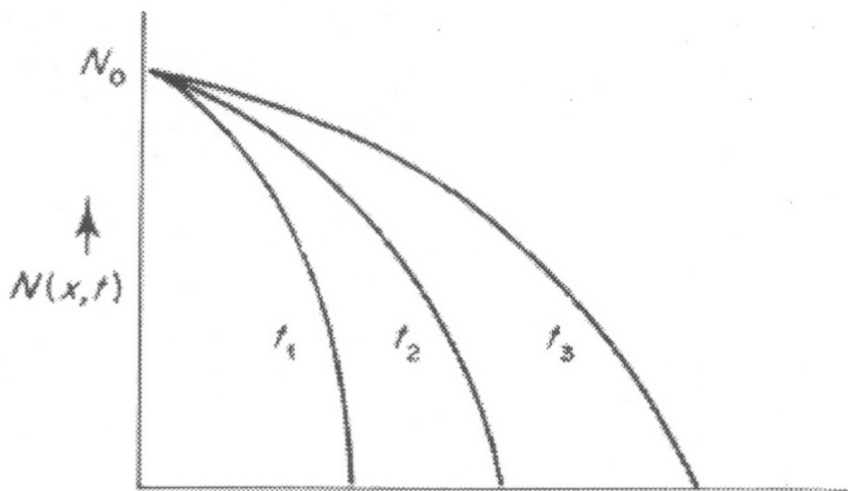
con opportune condizioni iniziali, e' possibile trovare i profili di concentrazione risultanti da un processo di diffusione.

1) diffusione da sorgente costante

Nei casi pratici, si ha, ad esempio, quando il wafer e' tenuto in ambiente gassoso a temperatura costante. In tal caso, noto N_0 , concentrazione superficiale degli atomi che diffondono, si ha:

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc}\{x/\sqrt{4Dt}\}$$

con N_0 e D dipendenti da T .



Drogaggio

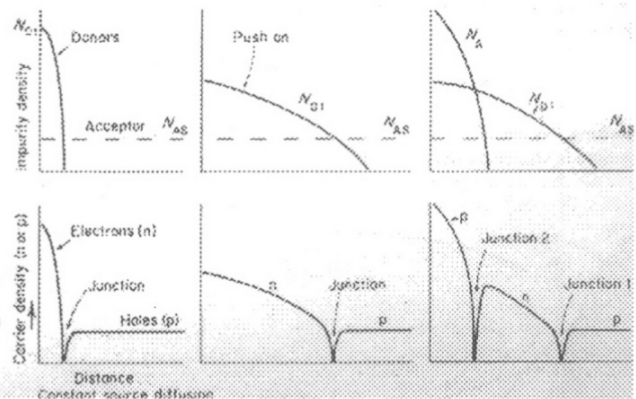
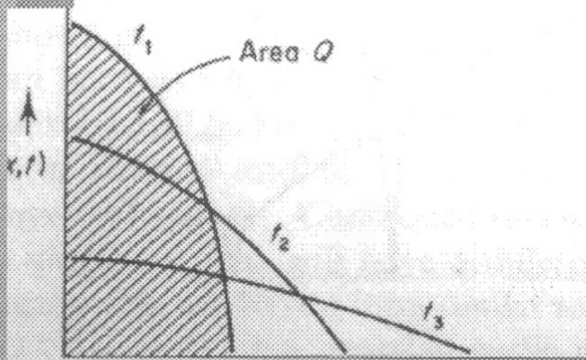
-10-

2) Diffusione da sorgente istantanea

In questo caso e' la quantita' totale di atomi diffusivi che viene tenuta costante. Si ha:

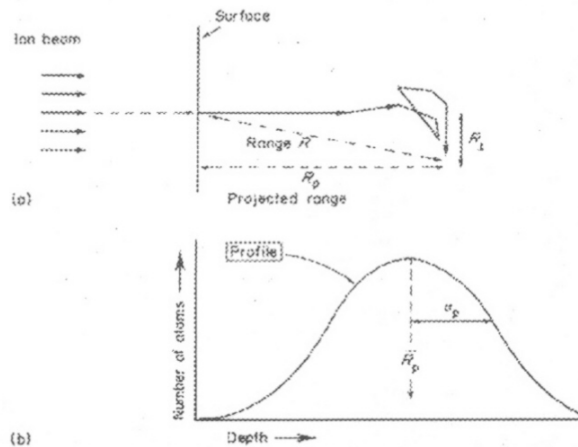
$$N(x,t) = Q / \sqrt{(\pi Dt)} e^{-x^2/4Dt}$$

Nei casi pratici si usano combinazioni dei due processi per ottenere profili diffusivi della forma voluta. Non tutti i semiconduttori sono in grado di sopportare le temperature necessarie alla diffusione senza produrre nel frattempo difetti strutturali (ad esempio nei composti puo' accadere che uno dei componenti abbia una T di fusione vicina alla T usata per la diffusione).



Impiantazione ionica

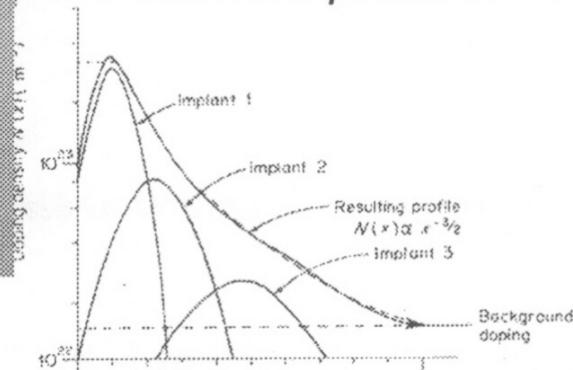
Gli atomi vengono iniettati in virtu' dell'energia cinetica acquistata dopo essere stati accelerati.



Si usano fasci monoenergetici. Una volta penetrati dentro il materiale, gli atomi impiantati si fermano a causa degli urti, sia contro gli elettroni, che pero' non ne cambiano significativamente la direzione, sia contro gli altri atomi.

In questo modo viene contemporaneamente prodotto un difetto reticolare. Per ovviare a questo inconveniente occorre successivamente scaldare il campione in modo che l'energia termica conferita permetta di colmare la lacuna con un atomo di drogante che si trova cosi' ad essere in una posizione regolare del reticolo.

Il profilo di concentrazione e' di tipo Gaussiano. Con impiantazioni successive ad energia differente, e' possibile ottenere profili di concentrazione qualsiasi.



Per localizzare le zone da impiantare sulla superficie del semiconduttore si usano delle maschere che consentono di selezionare con molta precisione la zona dell'impianto. L'impiantazione consente di rispettare con maggiore precisione la forma della maschera (nel caso della diffusione c'e' una considerevole migrazione di atomi anche al di la' del bordo della maschera e le maschere devono resistere alle alte T).

