

Semiconduttori

Mc128k, Giorgio Ghisotti

Contenuti

Indice

1	Semiconduttori	2
1.1	Livelli energetici	2
1.2	Materiali semiconduttori	4
1.2.1	Legame covalente	4
1.2.2	Dopaggio	5
1.2.3	Formule	6
1.3	Semiconduttori P e N	7

1 Semiconduttori

In un dispositivo le relazioni fra tensione e corrente possono essere lineari (che quindi seguono una legge esprimibile con un polinomio di primo grado come quella di Ohm) oppure non lineari.

Inoltre dalla fisica si conosce la legge di Ohm in forma locale data da $J = \sigma E$ e che un valore alto di σ (conducibilità elettrica) corrisponde a un conduttore mentre un valore vicino a 0 a un isolante; si potrebbe pensare che la via di mezzo rappresenta un materiale semiconduttore, ma non è così. Un semiconduttore possiede proprietà particolari più complesse e non descrivibili in forma lineare.

Molti componenti elettronici fanno uso di semiconduttori con proprietà specifiche, in particolare sono molto utilizzati diodi, transistor BJT e MOSFET.

1.1 Livelli energetici

Considerando un modello di atomo semplificato, si sa che gli elettroni possono essere in diversi livelli energetici, che determinano quanto sono vicini o lontani dal nucleo. Quelli più vicini possiedono più energia a causa della maggiore attrazione, e viceversa.

Dato che gli elettroni si comportano sia come particella che come onda, vi sono alcune caratteristiche che fanno in modo di permettere solo alcuni livelli energetici, e non qualunque. Questo è dato dal fatto che durante la "rivoluzione" attorno al nucleo deve essere presente un numero di oscillazioni discreto e in fase, data quindi la lunghezza d'onda è solo possibile in determinati casi. **Questa è una semplificazione**, in realtà gli atomi funzionano in modo diverso.

Gli elettroni quindi possono avere dei livelli energetici discreti e non continui, possono posizionarsi solo in certi "strati" determinati da una serie di fattori, si parla quindi di **quantizzazione della energia**.

Un'altra informazione essenziale è che ogni livello di energia può "contenere" un numero **finito** (e determinabile, generalmente 1, 2 o 4) di elettroni ad un dato istante. Per semplicità consideriamo come se ogni livello fosse saturato da un solo elettrone.

Quindi ad ogni orbita è associato un valore energetico e l'energia è distribuita in modo discreto. Gli elettroni possono passare da un livello ad uno superiore se ricevono una quantità **sufficiente** di energia tale da compensare il "salto", e viceversa quando scendono di un livello liberano energia (per esempio sotto forma di fotoni per i LED oppure calore).

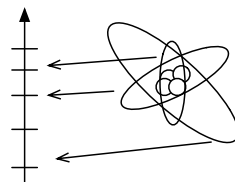


Figura 1: Livelli energetici

Considerando più atomi abbastanza vicini, si ha che le interazioni creano ulteriori livelli sulla scala, come in fig.2. Si ottengono regioni con densità di livelli maggiori (sempre in numero

finito) e spazi "vuoti" in mezzo. Dove sono presenti livelli sono "permessi" gli elettroni (e solo su di essi), mentre dalle altre parti sono "proibiti".

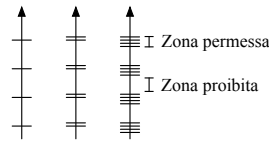


Figura 2: Livelli energetici con interazioni

Ogni livello energetico può essere "riempito" da un elettrone, e in condizioni di quiete gli elettroni è più probabile che occupino i livelli energetici più bassi fino a saturare gli strati inferiori, quindi effettivamente non permettendo la presenza di altri elettroni.

In queste condizioni si può stabilire un livello energetico al di sotto del quale tutti i livelli sono occupati, e viene denominato **livello energetico di Fermi** E_F . Possono esistere situazioni in cui E_F si trova in mezzo a dei livelli oppure in uno spazio proibito, questo elemento influisce sulla conducibilità del materiale.

Come già affermato è possibile fare salire un elettrone di livello cedendogli energia, nelle condizioni appena descritte si ha che se E_F è in mezzo a diversi livelli ravvicinati fra di loro ci vuole poca energia, al contrario se è in una zona vuota ci vuole più energia per fare arrivare gli elettroni nello strato superiore (fig.3).

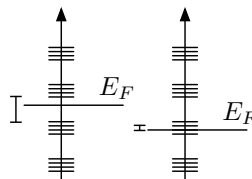


Figura 3: Livelli energetici con interazioni

La distanza fra due livelli energetici è detta **Energy Gap** ed è il "salto" che devono fare gli elettroni per passare da uno strato ad un altro, la differenza energetica tra il suo livello e il primo disponibile.

I conduttori hanno un livello di Fermi vicino ad un altro livello libero (ha una banda parzialmente occupata), quindi spostare un elettrone richiede poca energia. Al contrario, un isolante ha il livello di Fermi in mezzo a due bande (ha bande completamente piene), quindi l'energia necessaria a spostare un elettrone è molto più alta.

1.2 Materiali semiconduttori

Come un materiale isolante, un semiconduttore presenta bande completamente piene in stato di quiete, quindi il livello di Fermi è in una banda proibita, ma a differenza di un isolante ha un **gap molto più ridotto**, quindi il livello di Fermi non è molto distante dalla banda permessa successiva.

È quindi più *probabile* che gli elettroni, in temperatura ambientale (ricevono energia), passino da un livello al successivo formando effettivamente due bande con spazi liberi; essendo gli elettroni sia sopra che sotto più liberi di muoversi formano delle condizioni simili ad un conduttore. La banda che era piena ora è parzialmente occupata e anch'essa conduce - questa è la **differenza fondamentale** tra un semiconduttore, un conduttore e un isolante.

La banda al di sopra del livello di Fermi viene denominata **banda di conduzione**, mentre quella sotto **banda di valenza**, come in fig.4.

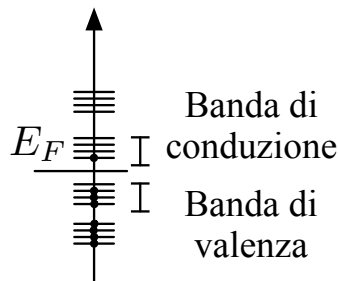


Figura 4: Banda di conduzione e di valenza

1.2.1 Legame covalente

In un legame covalente due atomi condividono alcuni elettroni, presi da quelli con energia più alta. I semiconduttori tipicamente sono quelli con più elettroni disponibili per questi legami, essendo nella 4^a colonna della tavola periodica.

Il più usato di gran lunga è il silicio (Si), che permette **4 legami covalenti**, ma si possono usare anche altri materiali come il germanio o combinazioni di elementi della terza e quinta colonna combinati.

Questo tipo di legame tende a formare dei cristalli di forma cubica con gli atomi di silicio, complicati da vedere in tre dimensioni, quindi si preferisce semplificarli come un reticolo (fig.5).

L'elettrone "libero" diventa quello di conduzione e si muove seguendo la legge di Ohm quando il tutto viene immerso in un campo elettrico (forza coulombiana). Quando si sposta fa in modo di "staccarsi" da un legame per occuparne un altro, lasciando inevitabilmente un posto libero dov'era; questo fa in modo di spostare la carica negativa rispetto alla direzione dell'elettrone, ma guardando l'atomo con una carenza di elettroni si può dire che viene contemporaneamente spostata una carica **positiva** in direzione opposta.

La carenza di elettroni (o la presenza di "buchi") è mediamente compensata dagli elettroni in eccesso nel materiale, formando una polarità neutra.

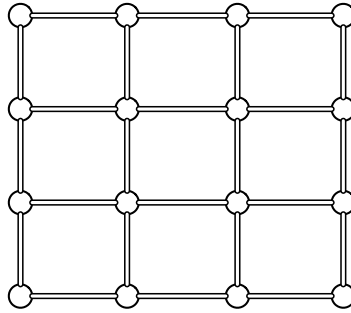


Figura 5: Cristallo di silicio

Facendo muovere gli elettroni (cariche negative) si può vedere come se ci fosse la presenza di cariche duali positive, anche se in realtà la carica positiva non è una vera particella si può lo stesso attribuirgli una massa ricavabile da leggi fisiche (dato che si muove come se avesse massa).

Dal punto di vista macroscopico quindi si può modellare un movimento di particelle negative e positive duali ad esse, che quindi esistono sempre in coppie.

Dato che ha poco senso parlare di numero di elettroni e lacune, si prende in considerazione il numero di elettroni liberi considerandone la densità:

$$n = \frac{\text{elettroni}}{\text{cm}^3} \quad (1.1)$$

$$p = \frac{\text{lacune}}{\text{cm}^3} \quad (1.2)$$

Con la immediata conseguenza che in media $p = n$. Quando le particelle si "annullano" si ha un fenomeno detto **ricombinazione**, con conseguente rilascio di energia. Viene definito G come il tasso di generazione coppie-lacune, quindi il numero di coppie generate in una unità di volume in una unità di tempo, e il suo tasso duale di ricombinazione R .

$$G = \frac{\text{coppie gen}}{\text{cm}^3 \text{s}} \quad (1.3)$$

$$R = \frac{\text{coppie ricomb}}{\text{cm}^3 \text{s}} \quad (1.4)$$

In condizioni di stazionarietà il materiale è "fermo", quindi $R = G$, il numero di coppie che si generano è circa uguale a quelle che si ricombinano.

Si ha quindi una **concentrazione intrinseca funzione della temperatura** che è circa dell'ordine di $10^{10} \frac{\text{coppie}}{\text{cm}^3} @ 300K$.

$$p = n = p = n_i(t) \quad (1.5)$$

1.2.2 Dopaggio

In condizioni normali in cui il cristallo è formato solo da silicio (monocristallino, quindi una struttura unica) si ha che $p = n$, quindi esiste un equilibrio di cariche positive (lacune) e negative (elettroni); durante la produzione si può fare in modo di alterare questa proprietà

sostituendo ad alcuni atomi del reticolo altri simili, presi per esempio dalla quinta colonna della tavola periodica.

Solo una minima parte di atomi viene sostituita dal materiale, detto **dopante**, e dove questo accade si ha un eccesso o difetto di elettroni, che quindi rende le quantità p e n non più uguali. Il processo che lo permette viene detto **drogaggio** o doping, e serve per alterare permanentemente la struttura del silicio per garantire nuove proprietà.

Un materiale viene detto **intrinseco** se non è drogato, ed **estrinseco in caso contrario**.

Per esempio se un atomo ha 5 elettroni di legame, 4 vanno a legarsi con gli altri atomi di silicio, mentre uno resta libero; questo elettrone libero è libero di andarsene, e quando lo fa lascia una carica positiva (dato che l'atomo ha più protoni che elettroni).

La differenza fondamentale di questa carica positiva dalle lacune viste prima è che questa rimane ferma nel reticolo, non è libera di muoversi. L'atomo viene detto **donatore**, dato che è disponibile a cedere un elettrone senza introdurre una lacuna mobile. Viene quindi chiamata N_d la concentrazione di atomi donatori (che si aggira su 10^{15} per cm^3).

Inoltre il fatto di aver inserito un atomo in più modifica le bande energetiche; esso si manifesta introducendo un livello aggiuntivo che va a ricadere nella banda proibita, con una distanza minore rispetto alla banda superiore.

Infine si può fare anche il contrario, quindi prendendo un elemento dalla terza colonna (es. boro, 3 elettroni di legame) si ha che rimane uno dei quattro legami vuoto; il comportamento stavolta è di una lacuna mobile, quindi una carica positiva che si sposta nel reticolo. Il legame mancante viene riempito, e l'atomo assume una carica negativa, dato che al nucleo corrisponde un elettrone in più. Viene detto **accettore** (tradotto male da inglese).

In queste condizioni $p > n$, e il livello aggiunto risulta in prossimità della banda di valenza, è quindi più facile che un elettrone di valenza vada a chiuderlo piuttosto che esso possa saltare nella banda di conduzione.

Per concludere, un materiale si può configurare in due modalità, con un eccesso o carenza di elettroni, quindi in temperatura ambiente circa tutti gli atomi droganti sono ionizzati.

1.2.3 Formule

Si ipotizzi una condizione in cui un materiale sia uniformemente drogato, quindi si ha la stessa condizione uguale ovunque.

Per un materiale intrinseco (non drogato) $p = n$, e $p \cdot n = n_i^2$. Per un materiale estrinseco (drogato) invece $p \neq n$, ma comunque si può dire lo stesso che il prodotto si mantiene costante (quindi se cresce un fattore cala l'altro), e il meccanismo che lo descrive si chiama **legge di azione di massa**.

In condizioni di equilibrio il tasso di generazione è circa uguale a quello di ricombinazione, inoltre si può ipotizzare che sia funzione della temperatura. Il tasso di generazione dipenderà solo dalla temperatura:

$$G = g(T) \quad (1.6)$$

Mentre il tasso di ricombinazione dipende non solo dalla temperatura ma anche dal numero di elettroni e lacune presenti (ovvio, niente si ricombina in assenza di particelle):

$$R = np \cdot r(T) \quad (1.7)$$

Quindi unendo le formule si ha:

$$np = \frac{g(T)}{r(T)} = f(T) \quad (1.8)$$

A questo punto, supponendo di conoscere i valori di N_A (**numero di accettori**) e N_D (**numero di donatori**), si vuole sapere quanto valgono p e n , che rispettivamente rappresentano le densità di lacune ed elettroni.

In un materiale drogato in modo uniforme, facendo ipotesi che in temperatura ambiente tutti gli atomi siano ionizzati, si può ipotizzare che tutti donatori abbiano donato e tutti accettori accettato elettroni. La carica totale del materiale Q è nulla, e se il dispositivo è uniforme allora la neutralità globale di carica si traduce in neutralità locale (carica complessiva nulla anche in una piccola porzione).

La densità di carica è localmente uguale a 0:

$$\rho = 0 \quad (1.9)$$

$$\rho = -qn + qp + qN_D - qN_A = q(N_D - N_A + p - n) = 0 \quad (1.10)$$

Dove q_n rappresenta il numero di cariche negative, q_p il numero di positive; la **carica fissa** del semiconduttore è data dalla differenza del numero di donatori e accettori $N_D - N_A$, $p - n$ è la carica mobile e la densità di carica complessivamente deve essere comunque nulla.

Sapendo che $pn = n_i^2(T)$ e conoscendo N_D e N_A si ottiene una equazione in due incognite, che risolta risulta:

$$N_D - N_A + \frac{n^2}{n} - n = 0 \Rightarrow n^2 - n(N_D - N_A) - n_i^2 = 0 \quad (1.11)$$

$$n = \frac{(N_D - N_A) \pm \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}}{2} \quad (1.12)$$

Il termine sotto radice risulta sempre più grande di $N_D - N_A$, se si scegliesse il segno negativo del \pm si avrebbe un numero n di elettroni per centimetro cubo negativo, che non ha senso, quindi si sceglie solo il segno $+$.

Facendo una procedura simile per p :

$$p = \frac{(N_A - N_D) \pm \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}}{2} \quad (1.13)$$

Si ottiene quindi il **principio di compensazione**, che di fatto indica che quello che conta non è la quantità assoluta del drogante, ma la differenza fra i tipi di droganti presenti nel materiale. Se si drogasse quindi con delle quantità uguali di accettore e donatore, la differenza $N_D - N_A$ sarebbe uguale a zero, si ha quindi $n = p = n_i$. Non ci sono atomi liberi in banda di conduzione, non ci sono lacune libere in banda di valenza, quindi non cambia niente.

1.3 Semiconduttori P e N

Un materiale viene drogato in modo non equivalente, quindi per esempio supponiamo che $N_D \gg N_A, n_i$. In questo modo si può contare solo N_D e trascurare n_i^2 , ottenendo:

$$n = \frac{N_D + \sqrt{N_D^2}}{2} = N_D \quad (1.14)$$

Quindi se si