

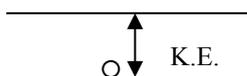
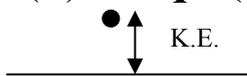
DIAGRAMMA A BANDE DI UNA GIUNZIONE PN

Per come e' stato definito, il diagramma a bande di un semiconduttore rappresenta l'insieme di energie permesse agli elettroni all'interno del semiconduttore in funzione della posizione. Inoltre, per un elettrone in banda di valenza, l'energia del gap rappresenta la minima energia che gli deve essere conferita per passare in banda di conduzione e potersi muovere liberamente all'interno del materiale. Percio' piu' la sua energia e' superiore ad E_c e maggiore e' l'energia posseduta dall'elettrone. Percio', se E e' l'energia complessiva dell'elettrone, $E-E_c$ rappresenta la sua energia cinetica. Quindi un elettrone che possiede esattamente E_c , si trova in banda di conduzione ma con energia cinetica nulla. Percio' E_c rappresenta l'energia potenziale dell'elettrone in banda di conduzione (rispetto ad un livello di riferimento arbitrario). In maniera analoga, E_v rappresenta l'energia potenziale di una lacuna in banda di valenza ed E_v-E rappresenta la sua energia cinetica.

Cosa succede se si applica un campo elettrico al materiale?

Ad un potenziale $V(x)$, corrisponde in ogni punto per un elettrone un'energia potenziale dovuta al campo elettrico:

$$U(x) = -qV(x)$$

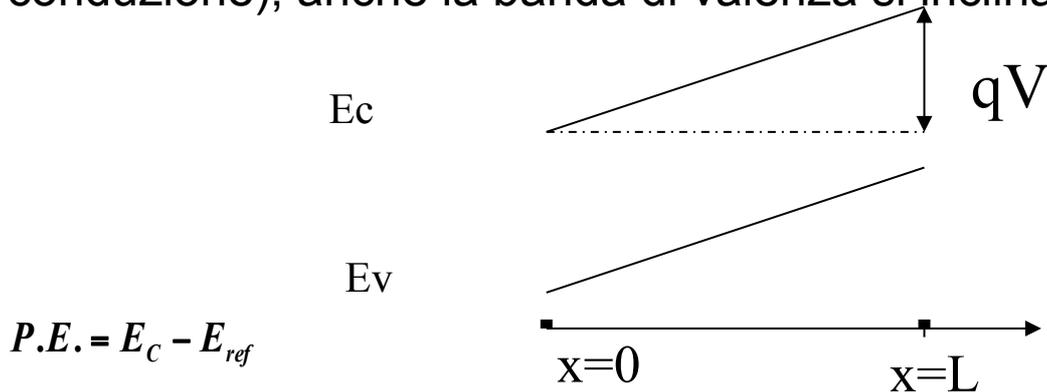


Se V e' espresso in Volt, e q in numero di elettroni, U e' dato, in eV, dallo stesso numero che esprime V .

Allora, se si applica una differenza di potenziale V ad un semiconduttore uniformemente drogato di lunghezza L , il potenziale varia gradualmente dal valore 0 per $x=0$ al valore V per $x=L$. Conseguentemente, anche U varia da 0 a V eV

Dunque, il livello E_c non può essere piatto, ma deve variare di qV eV passando da 0 a L.

Poiché l'energy gap deve rimanere costante (l'applicazione di un campo elettrico non cambia la quantità di energia necessaria a promuovere un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione), anche la banda di valenza si inclina..



$$U(x) = -qV(x)$$

Hanno tutte la stessa pendenza!

$$V(x) = -\frac{1}{q}(E_c - E_{ref})(x)$$

$$\varepsilon(x) = -\frac{dV(x)}{dx} \propto \frac{dE_c}{dx} = \frac{dE_v}{dx} = \frac{dE_i}{dx}$$

Le regole pratiche per costruire il diagramma a bande in condizione di equilibrio di una qualunque struttura elettronica sono le seguenti:

- Il livello di Fermi (all'equilibrio) è ' costante dappertutto*
- L'energy gap è costante dappertutto
- Lontano dalle regioni di giunzione la distanza relativa tra i tutti i livelli è identica a quella che si ha in una identica regione di semiconduttore non inserita in una giunzione
- Tutti i livelli devono essere continui (per questioni di conservazione dell'energia)

*Perche' il livello di Fermi all'equilibrio e' costante dappertutto?

Per dimostrarlo, consideriamo due materiali inizialmente non interagenti, caratterizzati da due diversi valori dell'energia di Fermi, E_{F1} e E_{F2} . Per ciascuno di essi vale la relazione:

$$n = g(E)F(E, E_F) \quad n = \text{livelli occupati,}$$

$$p = g(E)(1 - F(E, E_F)) \quad v = \text{livelli vuoti}$$

Se i due materiali vengono messi in contatto, avverra' un trasferimento netto di elettroni tra i due materiali che terminera' quando verra' raggiunto l'equilibrio (precisamente elettroni passeranno dal materiale in cui sono meno legati, ovvero con una minore funzione lavoro, al materiale in cui sono piu' legati). La probabilita' che il trasferimento avvenga sara' data dal prodotto della densita' di livelli occupati da un lato per quella dei livelli vuoti (con uguale energia) dall'altro. All'equilibrio, i fenomeni di trasferimento non cessano ma il bilancio netto e' zero. Percio':

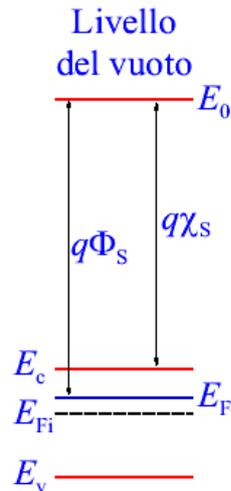
$$n_1(E)p_2(E) = n_2(E)p_1(E)$$

$$g_1(E)F_1(E, E_F)g_2(E)(1 - F_2(E, E_F)) = g_2(E)F_2(E, E_F)g_1(E)(1 - F_1(E, E_F))$$

$$g_1g_2F_1 - g_1g_2F_1F_2 = g_1g_2F_2 - g_1g_2F_1F_2$$

$$g_1g_2F_1 = g_1g_2F_2$$

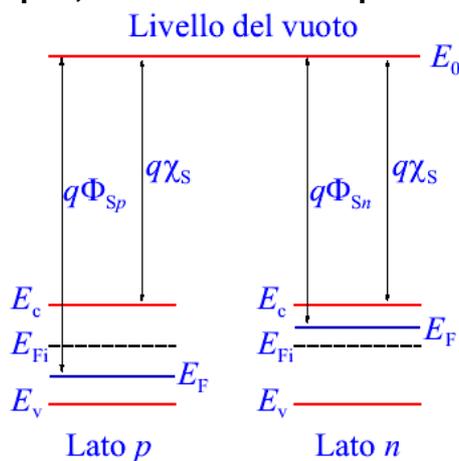
Da cui si ottiene: $F_1 = F_2$, ovvero $E_{F1} = E_{F2}$



Si definisce AFFINITA' ELETTRONICA, la quantita' che in figura e' indicata con $q\chi_s$, pari alla distanza tra il livello del vuoto e il bordo della banda di conduzione

La funzione Lavoro $q\phi_s$ (altrimenti detta Lavoro di Estrazione) e' invece pari alla distanza tra il livello del vuoto e il livello di Fermi. Il senso fisico di questa quantita' e' quello di minima energia che occorre fornire al sistema per estrarre da esso un elettrone.

Percio' rivedendo la costruzione del diagramma a bande della giunzione pn, alla luce di queste definizioni, si ha:

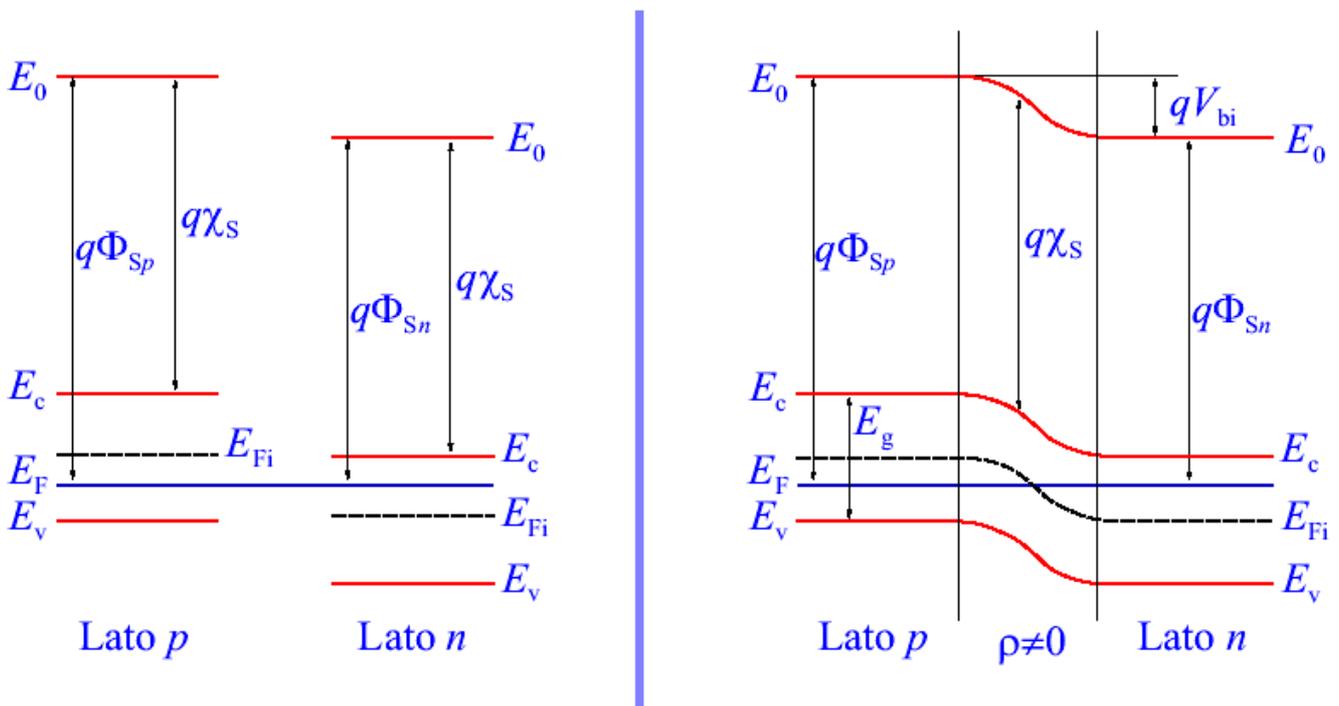


$$q\phi_{Sp} = q\chi_s + E_G - (E_F - E_V) = q\chi_s + E_G - k_B T \ln \frac{N_V}{N_{A4}}$$

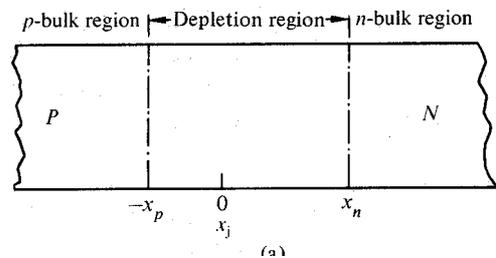
$$q\phi_{Sn} = q\chi_s + (E_C - E_F) = q\chi_s + k_B T \ln \frac{N_C}{N_D}$$

Le regole sono:

- Il livello di Fermi e' costante nella struttura
- L'affinita' elettronica e il gap sono costanti
- Lontano dalla giunzione il diagramma e' uguale a quello di ciascuno dei due lati preso isolatamente
- Il livello del vuoto e' continuo



Giunzione pn



La regione di transizione tra la zona p e la zona n e' detta REGIONE DI SVUOTAMENTO, mentre le zone laterali sono dette REGIONI DI BULK.

Facciamo alcune assunzioni:

- Il dispositivo e' monodimensionale
- Il punto di giunzione si trova ad $x = 0$
- Le zone p ed n sono uniformemente drogate e la variazione della concentrazione del drogaggio e' brusca (giunzione brusca)
- I contatti esterni della zone p ed n sono perfettamente ohmici (non c' e' caduta di potenziale)

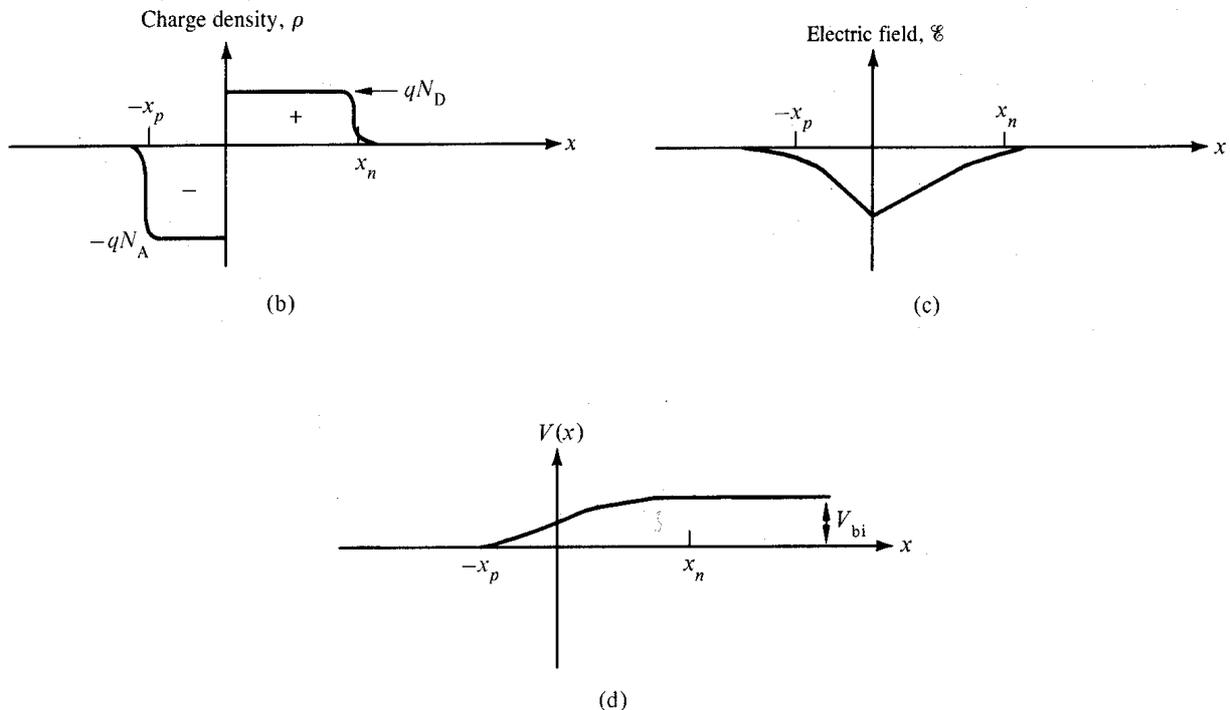
Equilibrio termodinamico significa che: non c' e' nessuna tensione applicata, siamo in assenza di illuminazione, la temperatura e' uniforme e non c' e' nessun campo elettrico o magnetico applicato. Inoltre all'interno del semiconduttore c' e' neutralita' di carica ovunque.

Cosa succede a elettroni e lacune quando le zone p ed n entrano in contatto?

Nella zona circostante la giunzione c'è un forte gradiente di concentrazione che determina la diffusione dei portatori. Le lacune diffondono dalla zona p alla zona n e gli elettroni dalla zona n alla zona p.

Nella diffusione le lacune lasciano dietro di sé delle zone ricche di carica, dovuta agli ioni accettori fissi, e perciò negativa. Viceversa gli elettroni si lasciano dietro delle zone cariche positivamente dovute alla presenza di ioni donori.

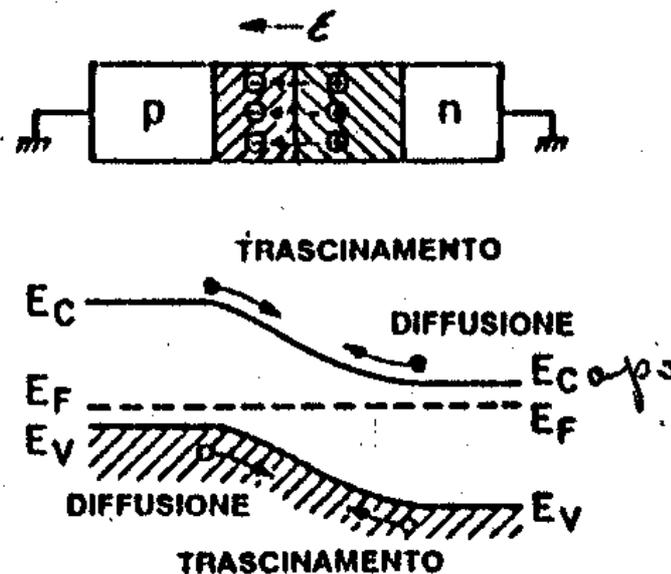
Come conseguenza della formazione di queste due regioni di carica spaziale si ha la formazione di un campo elettrico e quindi di un potenziale.



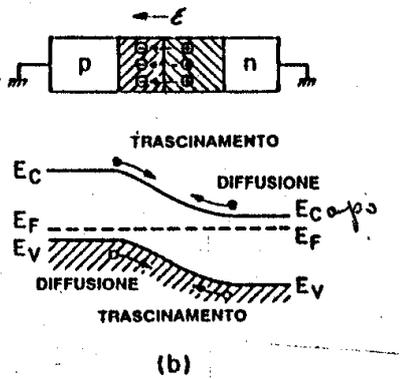
GIUNZIONE PN:

Dunque, nella costruzione del diagramma a bande di una giunzione pn, occorrerà considerare i diversi fenomeni che abbiamo osservato. Innanzitutto, il fatto che esista un campo elettrico nei dintorni della giunzione, indica che le bande in quell'intorno saranno inclinate. Inoltre, tale regione è svuotata, dunque il numero di elettroni in zona n e di lacune in zona p sono sensibilmente inferiori rispetto al loro valore lontano dalla giunzione.

Questo significa che poiché n è esponenzialmente dipendente dalla distanza $E_C - E_F$ (e p da $E_F - E_V$), nel diagramma E_C si allontana da E_F in zona n e E_F da E_V in zona p. Perciò il campo elettrico fa inclinare le bande, mentre il livello di Fermi resta piatto e costituisce un comodo livello di riferimento per il potenziale.



(b)



Il campo elettrico e' diretto dalla carica positiva verso quella negativa e quindi si oppone al moto delle lacune verso destra e degli elettroni verso sinistra. All'equilibrio il flusso netto della corrente attraverso la giunzione deve essere nullo.

L'immediata conseguenza della presenza del campo elettrico e' l'esistenza di un potenziale. Sappiamo infatti che esso e' legato al campo elettrico dall'equazione:

$$(1) \quad \epsilon(x) = -\nabla V(\mathbf{x})$$

ovvero, in una dimensione

$$(2) \quad \epsilon(x) = -\frac{dV}{dx}$$

da cui

$$(3) \quad V(x) = -\int_{-\infty}^x \epsilon(x) dx$$

Simboli: $\epsilon(x)$ = campo elettrico; $V(x)$ = potenziale;

All'equilibrio termodinamico tra i due lati della giunzione si ha una differenza di potenziale: V_{bi} (tensione di built-in). Come si calcola?

Il valore di V_{bi} si può dedurre imponendo che la densità di corrente per gli elettroni si annulli all'equilibrio termico

$$J_N = J_{Ndrift} + J_{Ndiff} = q\mu_n n \varepsilon + qD_n \frac{dn}{dx} = 0$$

Il che implica:

$$\varepsilon(x) = -\frac{qD_n}{q\mu_n n} \frac{dn}{dx} = -\left(\frac{D_n}{\mu_n}\right)\left(\frac{1}{n}\right)\left(\frac{dn}{dx}\right) = -\frac{KT}{q} \frac{1}{n} \frac{dn}{dx}$$

da cui si può ricavare V_{bi}

$$V_{bi} = -\int_{-\infty}^{+\infty} \varepsilon(x) dx = \frac{KT}{q} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{n(x)} \frac{dn}{dx} dx = \frac{KT}{q} \int_{n(-\infty)}^{n(+\infty)} \frac{dn}{n} = \frac{KT}{q} \int_{n(-\infty)}^{n(+\infty)} d \ln n$$

dove:

$$n(-\infty) = n_p = \frac{n_i^2}{N_A} \quad \text{per cui:} \quad V_{bi} = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$
$$n(+\infty) = n_n = N_D$$

ESEMPIO:

Giunzione p-n di Silicio a temperatura ambiente ($KT=0.026\text{eV}$)

1. Dati:

$$N_A = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

Giunzione simmetrica



$$V_{bi} = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} = \frac{0.026}{1} \ln \frac{10^{15} \cdot 10^{15}}{(10^{10})^2} = 0.026 \ln 10^{10} = 0.599V$$

2. Dati:

$$N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

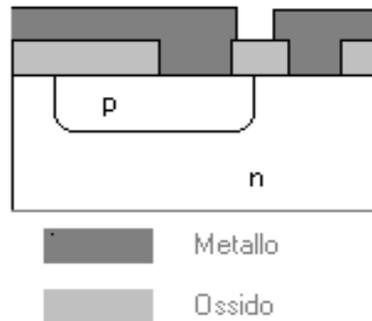
$$N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

Giunzione asimmetrica



$$V_{bi} = 0.718V$$

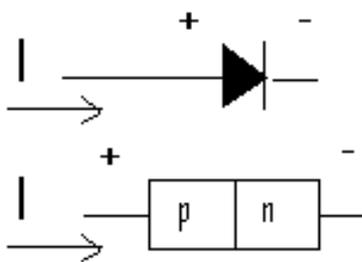
La giunzione p-n e' un dispositivo elettronico



Ovvero un componente che svolge una funzione all'interno dei circuiti elettronici.

Tecnologicamente le giunzioni p-n vengono realizzate tramite diffusione o impiantazione ionica di atomi droganti in semiconduttori già drogati in precedenza.

Il diodo a giunzione p-n standard ha un suo simbolo che indica la direzione in cui scorre la corrente:



Tale figura indica il simbolo e la definizione per correnti e tensioni positive. Se alla zona p e' applicata una tensione positiva rispetto alla zona n, il diodo viene detto in polarizzazione diretta e la corrente cresce rapidamente con la tensione. Quando invece alla zona p e' applicata una tensione negativa il diodo e' detto in polarizzazione inversa e il flusso di corrente sara' molto basso

Lo studio della giunzione p-n riguarderà':

1. L'esame della giunzione in condizioni statiche:
 - a) senza tensione applicata
 - b) con tensione applicata
 - In polarizzazione diretta
 - In polarizzazione inversa
2. Caratteristica corrente-tensione del diodo ideale
3. Dal diodo ideale al diodo reale:
 - a. Polarizzazione diretta
 - b. Polarizzazione inversa
- Caratteristiche circuitali del diodo

Nello studio della statica della giunzione p-n focalizzeremo l'attenzione nella regione di transizione tra le regioni p ed n, esaminandone il comportamento nelle tre condizioni fondamentali:

- All'equilibrio termodinamico ($V_A = 0$)
- In polarizzazione diretta ($V_A > 0$)
- In polarizzazione inversa ($V_A < 0$)