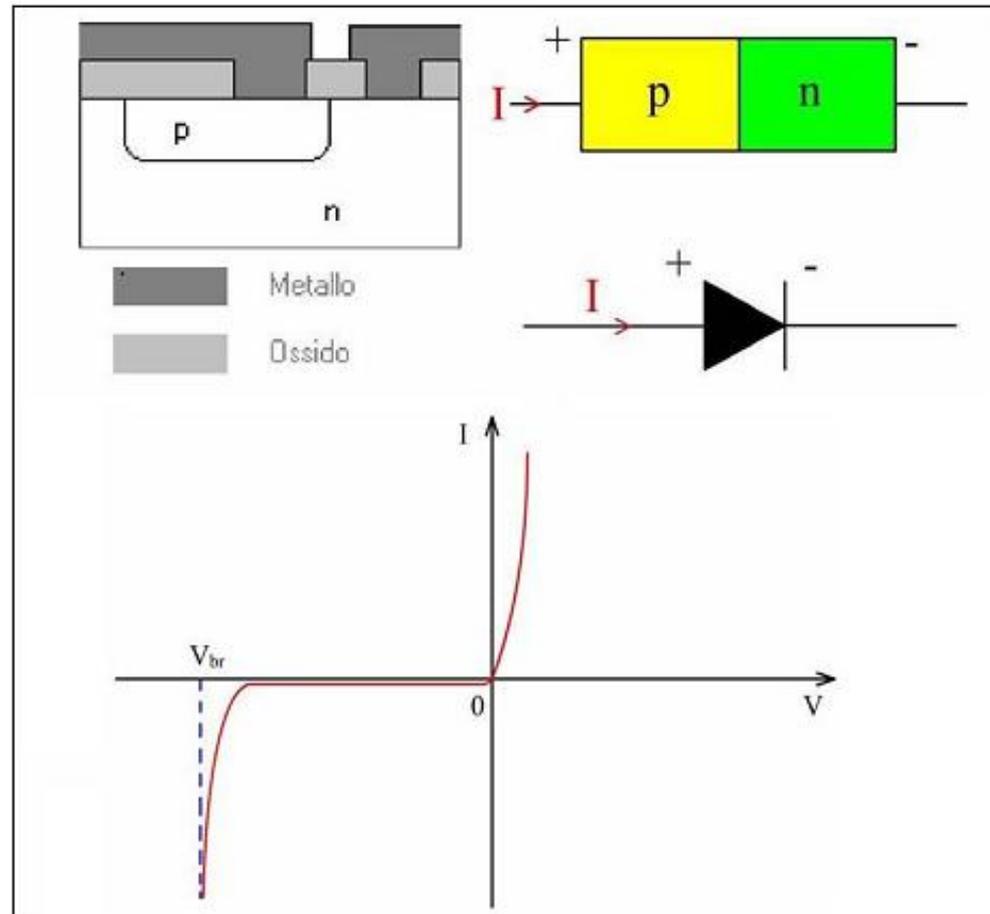


La giunzione pn

La giunzione pn

Tecnologicamente esistono diversi modi per poter realizzare una giunzione pn (epitassia, oppure diffusione o impiantazione ionica di atomi droganti in un semiconduttore già drogato)



Elettrostatica della giunzione pn

Facciamo alcune assunzioni:

- Il dispositivo è 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 è brusca (giunzione brusca)
- I contatti esterni della zone p ed n sono perfettamente ohmici (non c'è caduta di potenziale)
- Neutralità di carica ovunque

Equilibrio termodinamico:

Non c'è nessuna tensione applicata, siamo in assenza di illuminazione, la temperatura è uniforme e non c'è nessun campo elettrico o magnetico applicato

Elettrostatica della giunzione pn

Nella zona circostante la giunzione c'è un **forte gradiente di concentrazione** che determina la **diffusione dei portatori**.

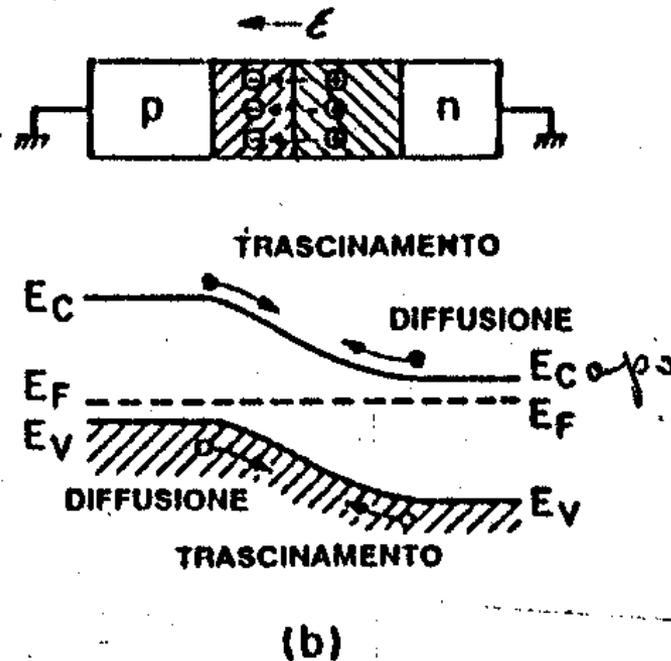
Le lacune diffondono dalla zona p alla zona n e gli elettroni dalla zona n alla zona p.

Nella diffusione le lacune lasciano dietro di sé delle zone ricche di carica, dovuta agli ioni accettori fissi, e perciò negativa ($-qN_A$)

Viceversa gli elettroni si lasciano dietro delle zone cariche positivamente dovute alla presenza di ioni donori (qN_D)

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

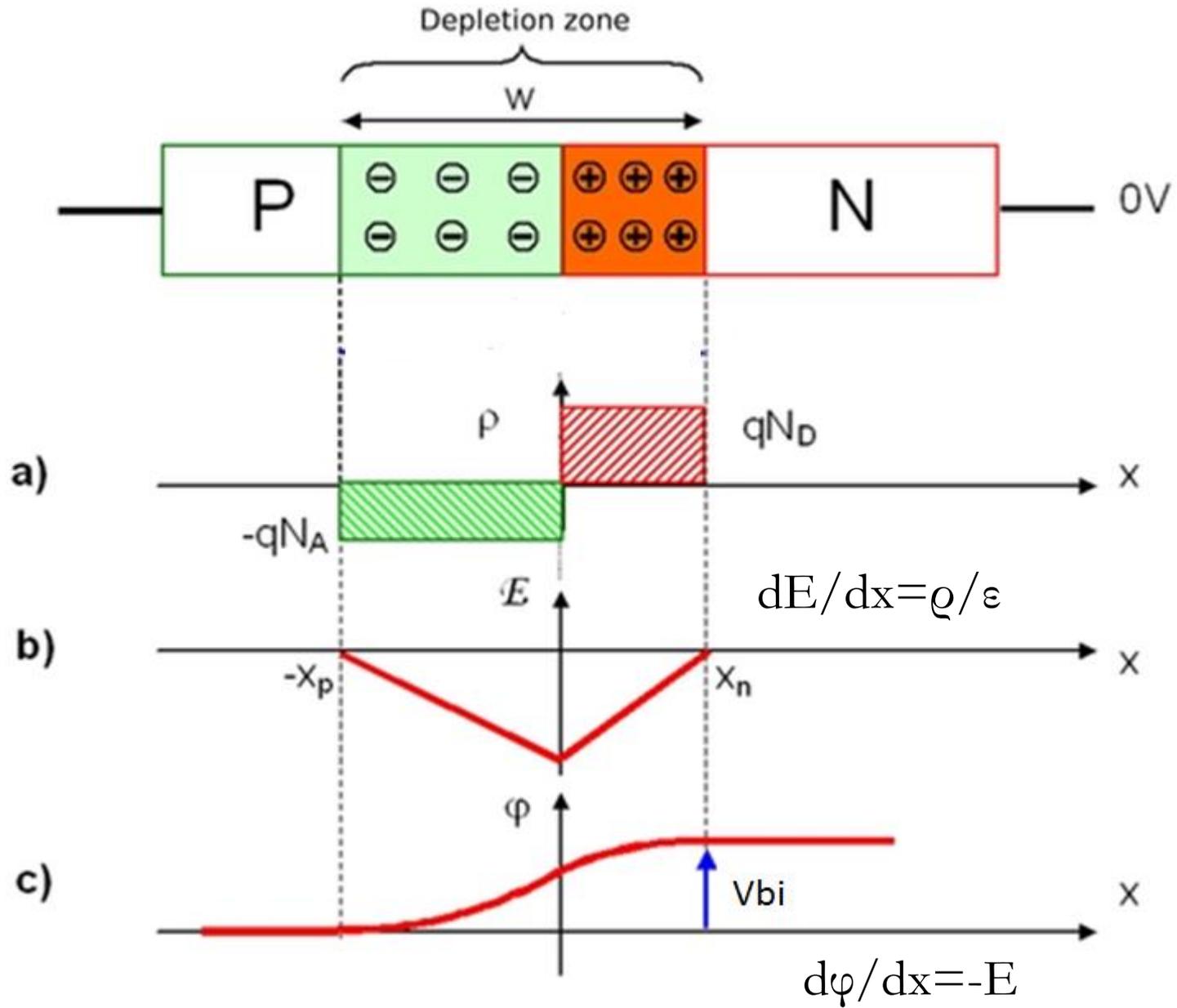
Elettrostatica della giunzione pn



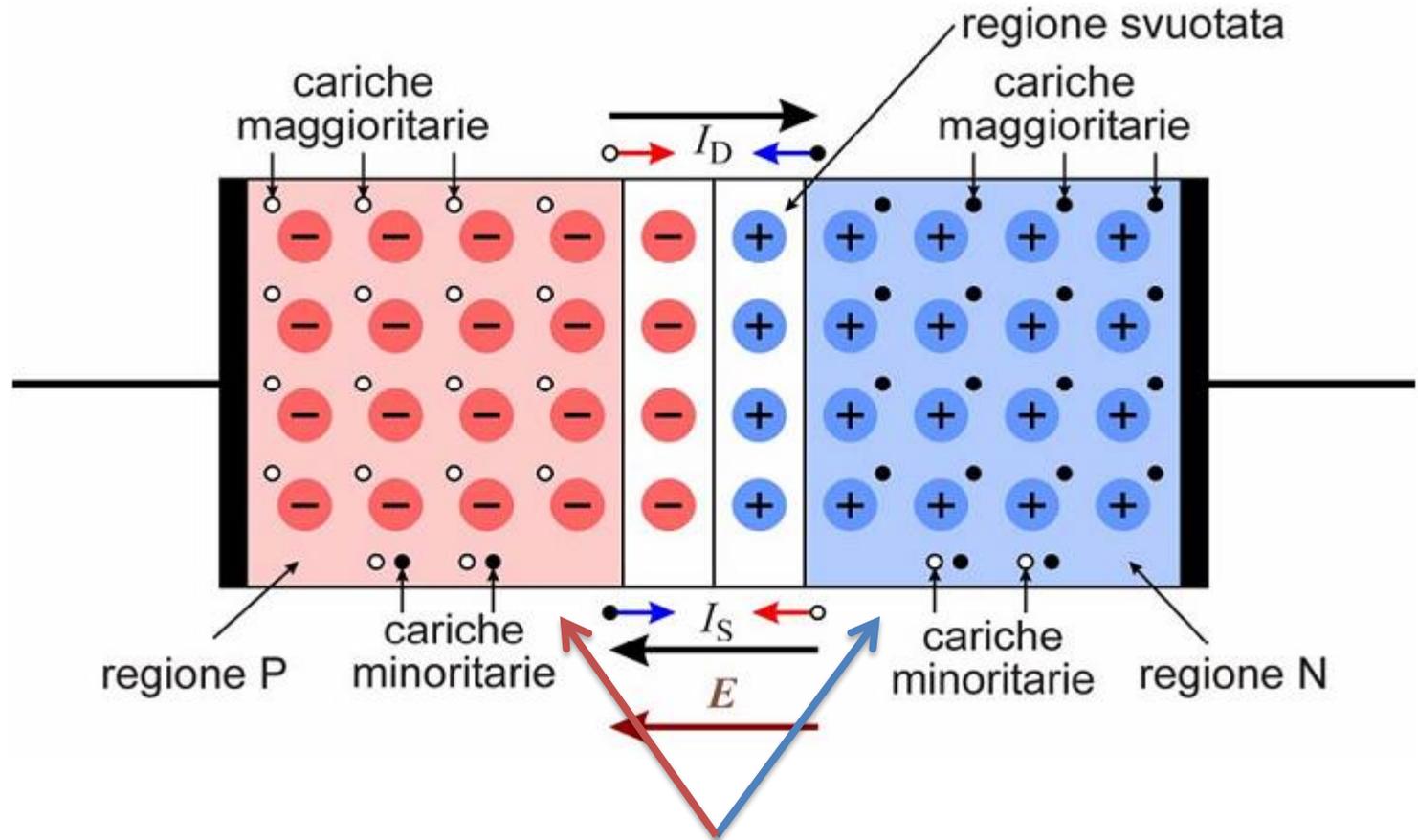
Il campo elettrico generato dalla carica spaziale punta dalle cariche positive a quelle negative e una conseguente **corrente di trascinamento** che opposta alla corrente di diffusione!

All'equilibrio termodinamico, il flusso netto deve essere nullo!

Elettrostatica della giunzione pn

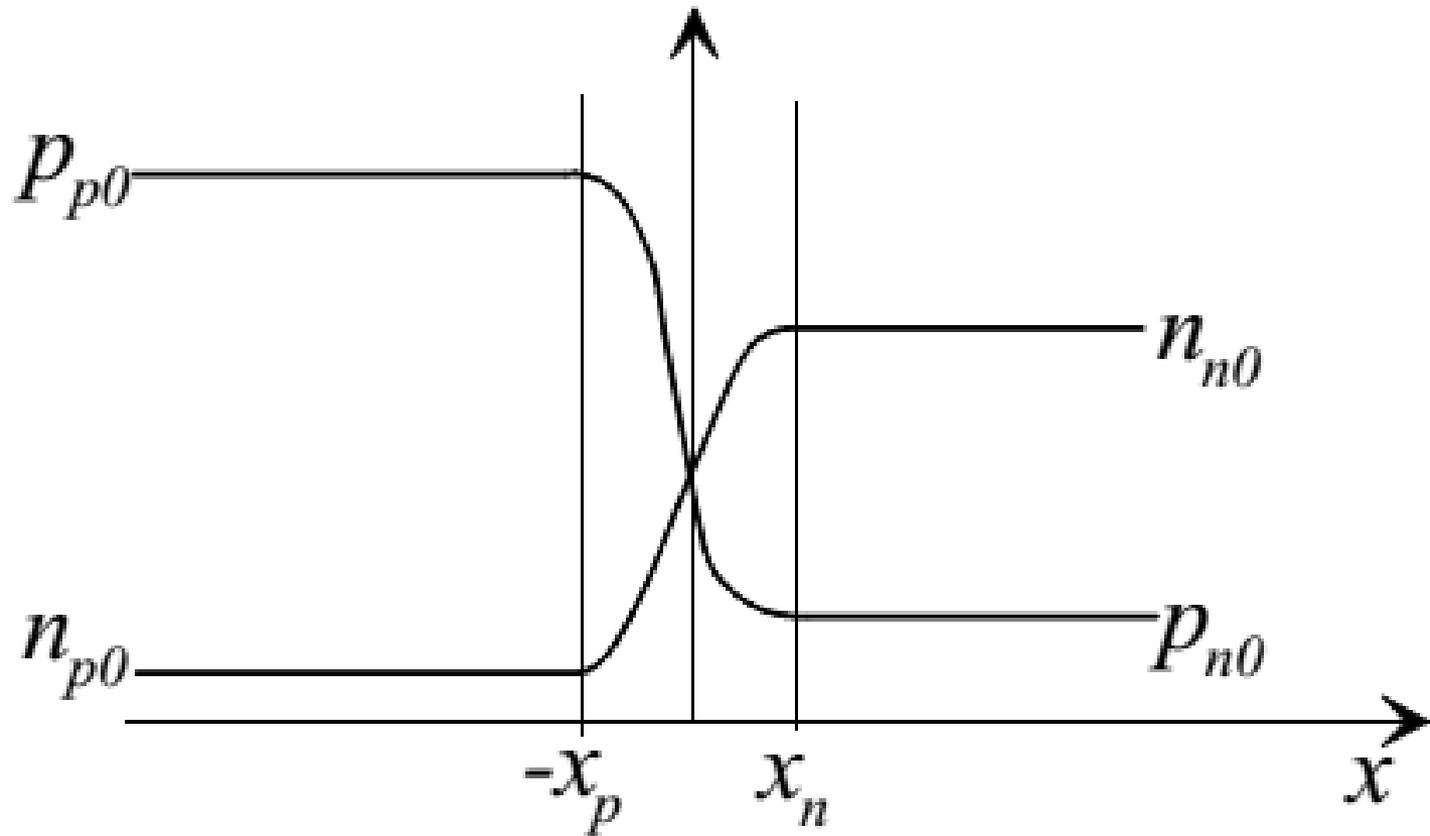


Elettrostatica della giunzione pn



Regioni neutre

Elettrostatica della giunzione pn



Introduzione al diagramma a bande di una giunzione pn

L'elettronvolt, quel misterioso individuo!

L'elettronvolt è l'energia acquisita da una carica pari a quella di un elettrone quando applico una differenza di potenziale di 1V

Per cui a 1 V corrisponde 1eV, a 10 V \rightarrow 10 eV

Perché (per $T=300$ K) se $kT/q= 0,0259$ V

$kT = 0,0259$ eV?

$q= 1.6 \times 10^{-19}$ C

Se moltiplico $V \times C$ ottengo Joule, non eV!!!!

$1eV= 1.6 \times 10^{-19} J$

Ancora sui semiconduttori

Il diagramma a bande di un semiconduttore rappresenta l'insieme di energie permesse agli elettroni all'interno del semiconduttore in funzione della posizione.

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.

Perciò più la sua energia è superiore ad E_c e maggiore è l'energia posseduta dall'elettrone.

Perciò, se **E è l'energia complessiva dell'elettrone,**
 $E - E_c$ rappresenta la sua energia cinetica

Ancora sui semiconduttori

Quindi un elettrone che possiede esattamente E_c , si trova in banda di conduzione ma con energia cinetica nulla.

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.

In altre parole, **E_c (E_v)** rappresenta l'energia potenziale dell'elettrone in banda di conduzione (lacuna in banda di valenza) (rispetto ad un livello di **RIFERIMENTO ARBITRARIO**).

Ancora sui semiconduttori

L'energia potenziale, infatti, è conosciuta a meno di una costante additiva (E_{ref}) che deve essere un riferimento **costante in tutto il materiale**

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 $U(x)$*** dovuta al campo elettrico:

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

Ancora sui semiconduttori

Se si applica una differenza di potenziale V_0 ad un semiconduttore uniformemente drogato di lunghezza L , il potenziale varia gradualmente dal valore 0 per $x=0$ al valore V_0 per $x=L$.

Di conseguenza anche U varia da 0 a V_0 eV

E_c non sarà piatto!

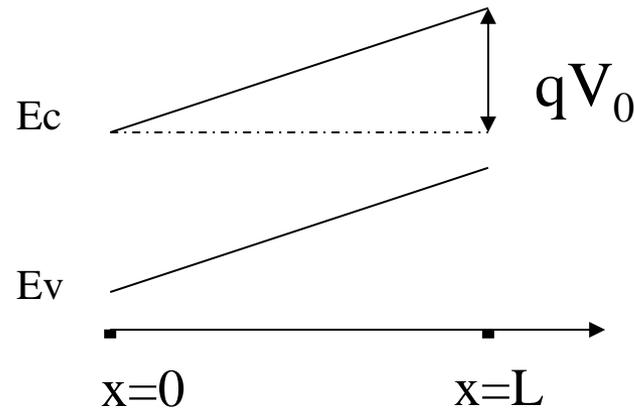
Ma deve variare anche lui di una quantità che va da 0 a V_0 eV

N.B. il band gap non cambia!!!

Il campo elettrico applicato non modifica l'energia necessaria per promuovere un elettrone in banda di conduzione

Ancora sui semiconduttori

Se si applica una differenza di potenziale V non solo modifico la pendenza della banda di conduzione, ma anche quella della banda di valenza



$$P.E. = E_C - E_{ref}$$

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

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

$$\varepsilon(x) = -\frac{dV(x)}{dx} = \frac{1}{e} \frac{dE_C}{dx} = \frac{1}{e} \frac{dE_V}{dx} = \frac{1}{e} \frac{dE_i}{dx}$$

**Tutte le bande hanno
la stessa pendenza**

Ancora sui semiconduttori

Dunque, nella costruzione del diagramma a bande di una giunzione pn, occorrerà considerare i diversi fenomeni che abbiamo osservato.

Esiste un campo elettrico nei dintorni della giunzione, → le bande in quell'intorno saranno inclinate.

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.

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.

- Il campo elettrico fa inclinare le bande
- Il livello di Fermi resta piatto

Livello di Fermi costante

Consideriamo due materiali inizialmente non interagenti, caratterizzati da **due differenti densità di stati, $g_1(E)$ e $g_2(E)$** , e **due diversi valori dell'energia di Fermi, E_{F1} e E_{F2}** da cui le distribuzioni di Fermi saranno $F(E, E_{F1})$ e $F(E, E_{F2})$

Per i due sistemi abbiamo una **densità di stati occupati** e di **stati liberi** pari a

$$n_i = g_i(E)F(E, E_{Fi}) \quad \text{Con } i=1, 2$$

$$v_i = g_i(E)(1 - F(E, E_{Fi}))$$

Livello di Fermi costante

Se i due materiali vengono messi in **contatto**, avverrà un **trasferimento netto di elettroni** tra i due materiali (in entrambi i versi) che terminerà quando verrà raggiunto l'equilibrio

La probabilità che un elettrone di energia E passi da un sistema all'altro (ad energia E) dipende dal prodotto della probabilità che si trovi a quella energia nel sistema 1, moltiplicata per la probabilità che a quell'energia, nel sistema 2, corrisponda uno stato vuoto



Livello di Fermi costante

All'equilibrio, i fenomeni di trasferimento non cessano ma il bilancio netto è zero.

Perciò:

$$n_1(E)v_2(E) = n_2(E)v_1(E)$$

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

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

$$g_1g_2F_1 - g_1g_2F_1F_2 = g_1g_2F_2 - g_1g_2F_1F_2$$

$$g_1g_2F_1 = g_1g_2F_2$$

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