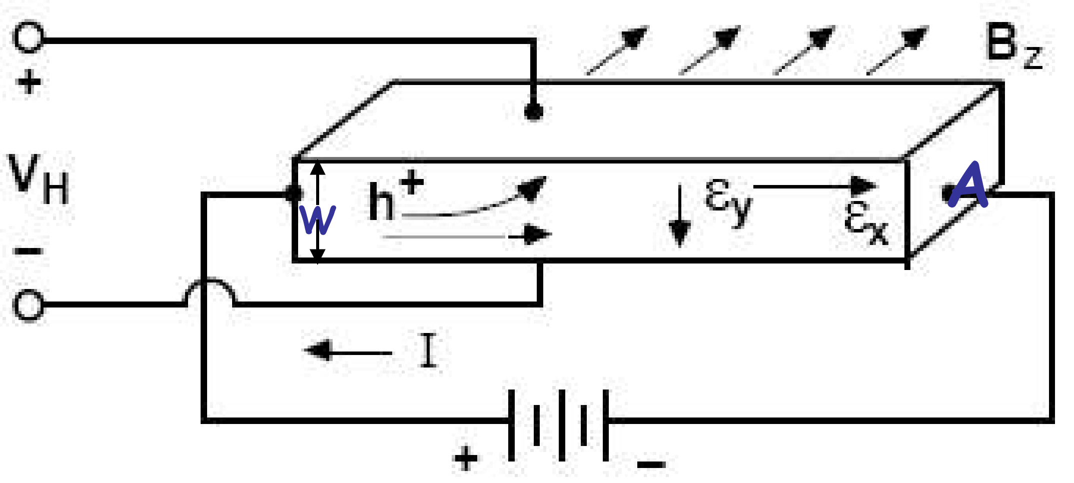
Effetto Hall

- prova sperimentale dell'esistenza delle **lacune**



- forza di Lorentz

$$q\mathbf{v}\times\mathbf{B} = qv_x B_z = q\mathcal{E}_y \quad \Rightarrow \quad \mathcal{E}_y = v_x B_z$$

$$V_H = \mathcal{E}_y \times (spessore) \quad tensione\ di\ Hall$$

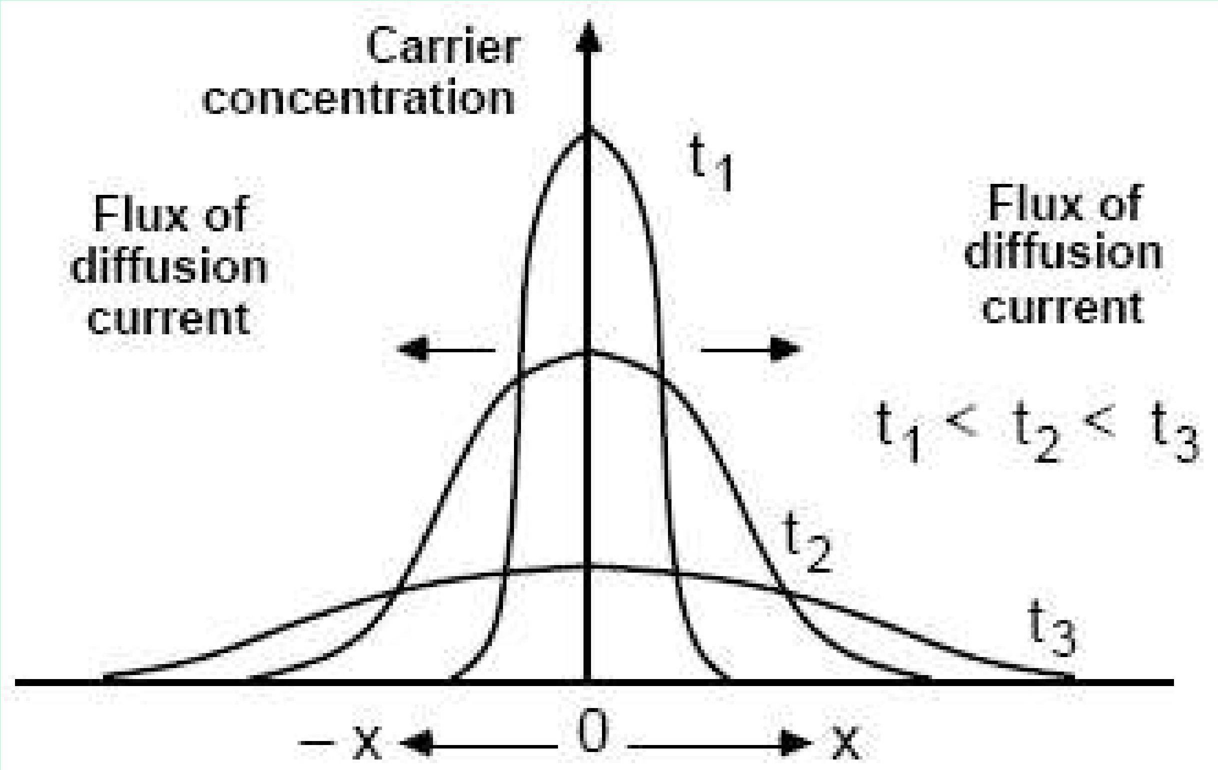
$$poich\grave{e} \quad v_p = J_p / qp \quad \Rightarrow \quad \mathcal{E} = \left(\frac{J_p}{qp}\right) B_z = R_H J_p B_z \quad con \quad R_H = \frac{1}{qp}$$

$$analogamente \quad R_H = -\frac{1}{qn}$$

$$inoltre \quad p = \frac{1}{qR_H} = \frac{J_p B_z}{q\mathcal{E}_y} = \frac{(I/A) B_z}{q(V_H/W)} = \frac{IB_z W}{qV_H A}$$

Moto dei portatori per diffusione

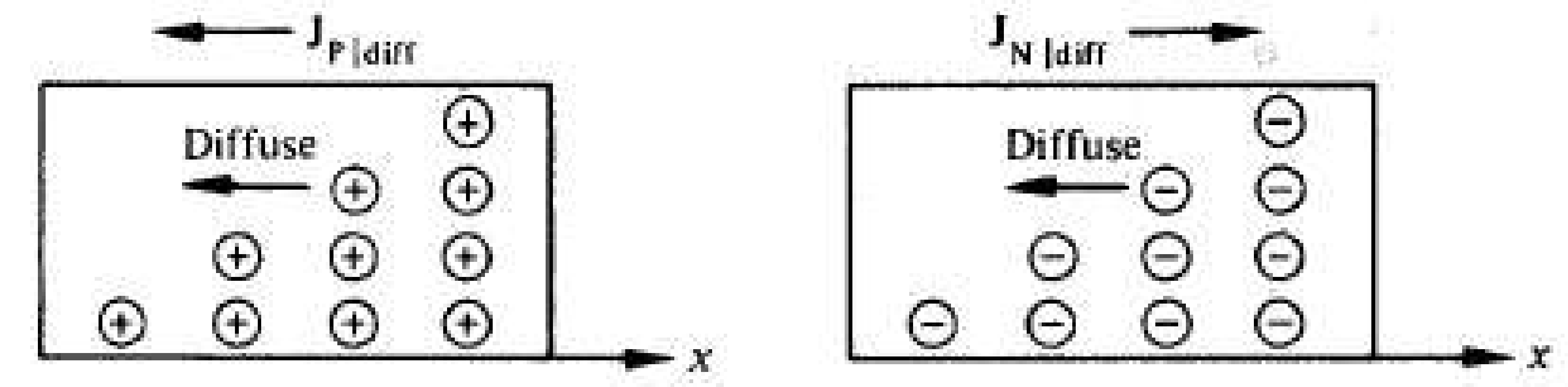
- in presenza di **gradienti di concentrazione**, i portatori **diffondono** da regioni ad alta concentrazione verso quelle a bassa concentrazione



Modello microscopico di diffusione 2-D

Trasporto per diffusione

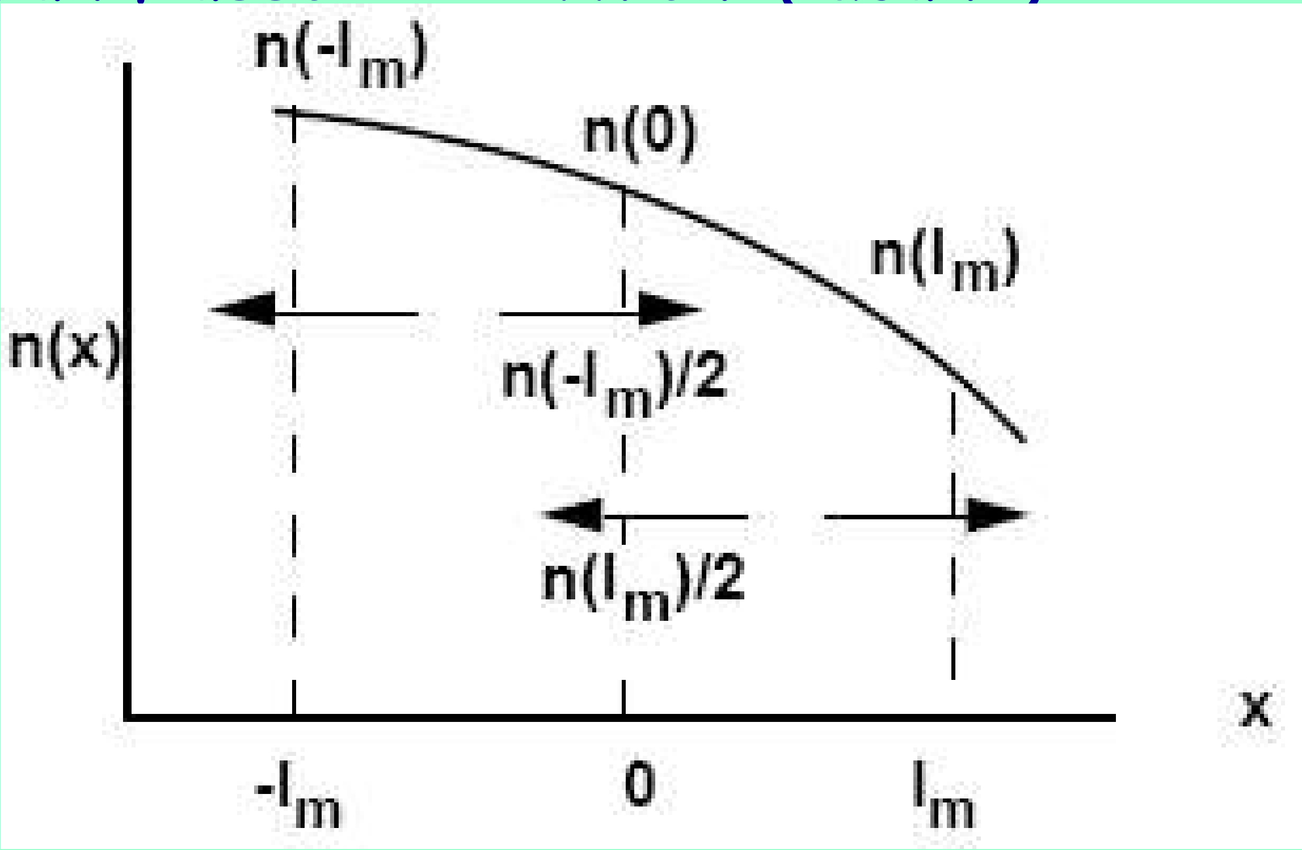
- All'equilibrio termico, in una rappresentazione semplificata 2-D, ciascun portatore ha eguale probabilità di muoversi in direzione **x** o **–x**.
- Se esiste un gradiente di concentrazione ci sarà un **flusso** netto di portatori verso le zone a concentrazione più bassa



flusso di portatori dovuto a diffusione di elettroni e lacune

I legge di Fick

- il gradiente di concentrazione riportato in figura genera un flusso di elettroni (lacune)



che può essere così calcolato:

I legge di Fick (1)

$$F_n = \frac{1}{2} v_{th} \left[n(-l_m) - n(l_m) \right] = \frac{1}{2} v_{th} \left\{ \left[n(0) - \frac{dn}{dx} l_m \right] - \left[n(0) + \frac{dn}{dx} l_m \right] \right\} =$$

$$= -v_{th} l_m \frac{dn}{dx} = -v_{th} v_{th} \tau_m \frac{dn}{dx}$$

$$essendo \quad \frac{1}{2} m v_{th}^2 = \frac{1}{2} kT \ (caso\ unidim.) \quad e \quad \mu_n = \frac{q\tau_m}{m_n} \quad si\ \ ha$$

$$F_n = -\frac{kT}{m_n} \frac{m_n \mu_n}{q} \frac{dn}{dx} = -\frac{kT}{q} \mu_n \frac{dn}{dx} = -D_n \frac{dn}{dx}$$

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \quad coefficiente\ \ di\ \ diffusione\ (relazione\ di\ Einstein)$$

$$Analogamente \qquad F_p = -D_p \frac{dp}{dx}$$

I legge di Fick (2)

- F_n e F_p = flusso di elettroni e lacune
- D_n = coefficiente di diffusione per elettroni nel Si a RT $D_n \approx 38\ cm^2/sec$
- D_p = coefficiente di diffusione per lacune nel Si a RT $D_p \approx 13\ cm^2/sec$
- Combinando i flussi si ricava il contributo della **corrente di diffusione**

$$I = AqD_n \frac{dn}{dx} - AqD_p \frac{dp}{dx}$$

Equazioni del trasporto

- Se entrambi i fenomeni di **trascinamento** e **diffusione** sono presenti, si ha

trascinamento

diffusione

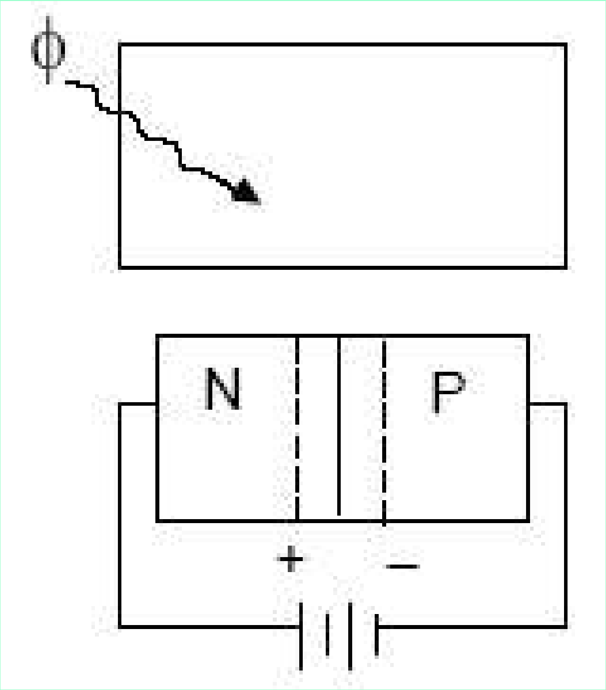
$$I_n = qA\left(\mu_n n \mathcal{E} + D_n \frac{dn}{dx}\right)$$

$$I_p = qA\left(\mu_p p \mathcal{E} - D_p \frac{dp}{dx}\right)$$

$$I_{tot} = I_n + I_p$$

Condizioni di Non-Equilibrio

- In equilibrio termico $\mathbf{np = n_i^2}$
- in queste condizioni si possono calcolare n, p, E_f ... tuttavia molti dispositivi operano in condizioni di non-equilibrio



iniezione
portatori aggiuntivi generati otticamente o elettricamente: $np > n_i^2$

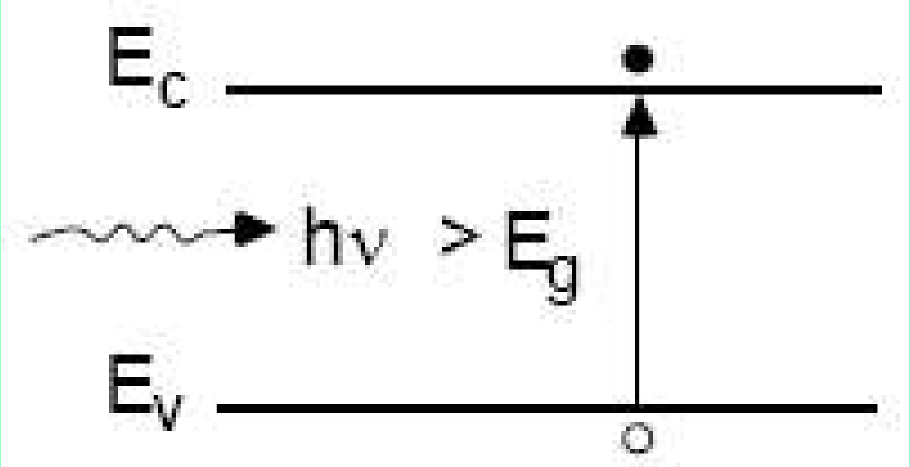
estrazione
portatori rimossi elettricamente: $np < n_i^2$

Generazione/Ricombinazione

- se la densità di portatori è più elevata di quella all'equilibrio termico, appena rimossa la sorgente di eccitazione, la densità di portatori tende nel tempo a ritornare alla conc. di equil. () mediante il meccanismo della **ricombinazione** elettrone/lacuna
- analogamente farà nel caso di densità bassa attraverso il meccanismo della **generazione** di coppie elettrone/lacuna
- R = tasso di ricombinazione ($\#/cm^3 \cdot sec$)
- G = tasso di generazione ($\#/cm^3 \cdot sec$)
- all'equilibrio $G_{th} = R_{th} \Rightarrow n = p = n_i$

Disequilibrio

- **Iniezione in semiconduttore intrinseco (non drogato)**



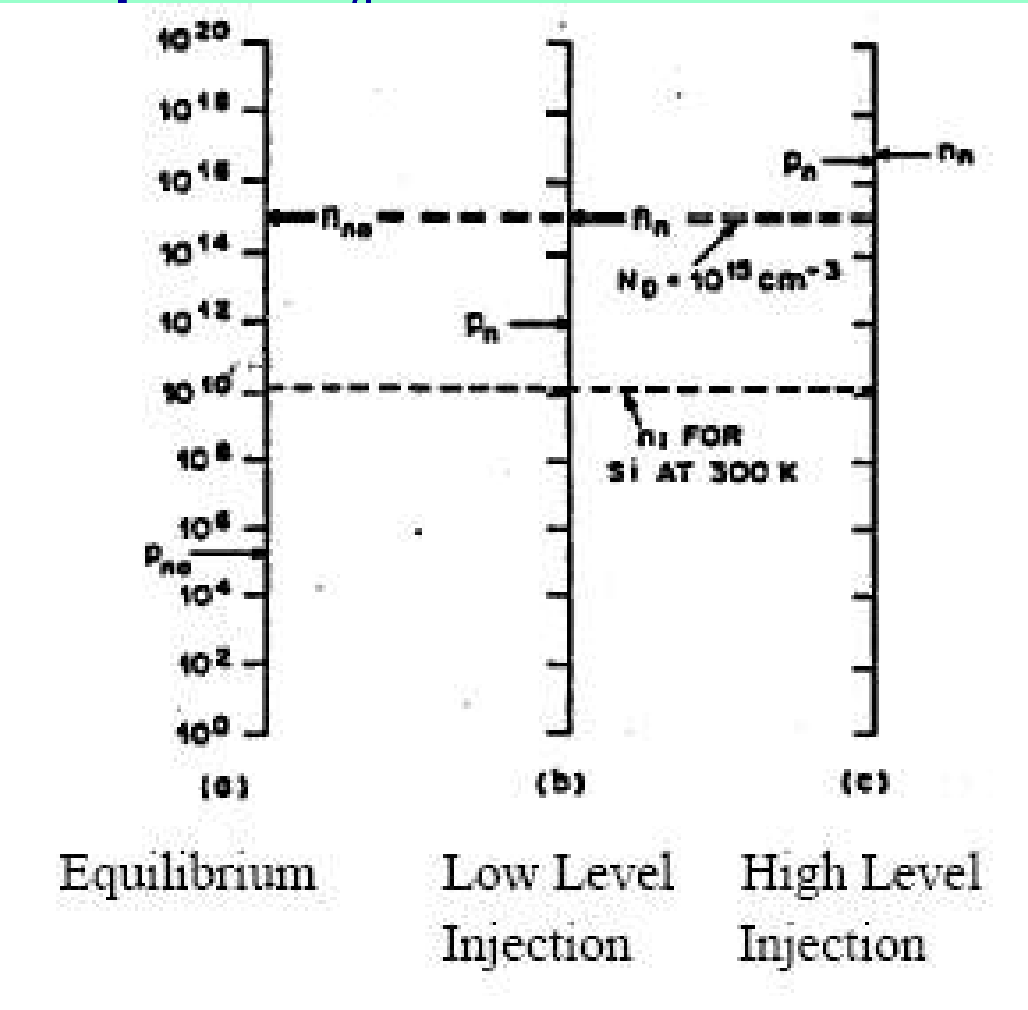
$$n = n_i + \Delta n$$

$$p = n_i + \Delta p$$

$$n,\ p > n_i$$

Disequilibrio

- **iniezione in semiconduttore estrinseco (drogato)**
  p.es. $N_d=10^{15}$ cm^{-3}



$$n \approx N_d + \Delta n$$

$$p \approx n_i^2 / N_d + \Delta p$$

$$\textit{bassi livelli di iniezione} \quad \Delta n = N_d$$

$$\textit{alti livelli di iniezione} \quad \Delta n \ ? \ N_d$$