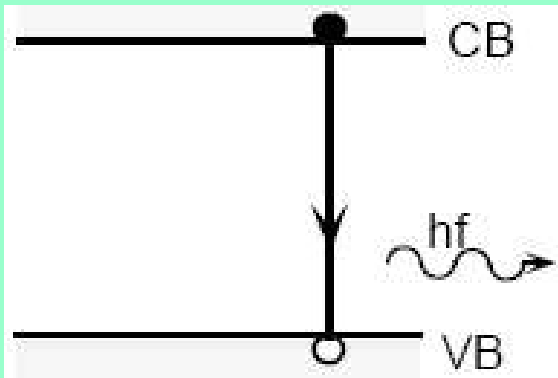


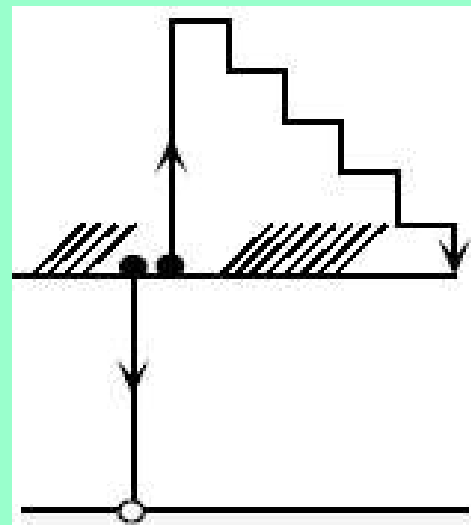
Ricombinazione

- Diversi sono i meccanismi di ricombinazione che agiscono contemporaneamente. Tuttavia il **più veloce** è quello che determina il tasso totale di ricombinazione



Ricombinazione radiativa

- un elettrone in *CB* si ricombina direttamente con una lacuna in *VB*, con emissione di un fotone $h\nu$
- si realizza in presenza di "gap" diretta
- in questi casi rappresenta il più importante canali di ricombinazione

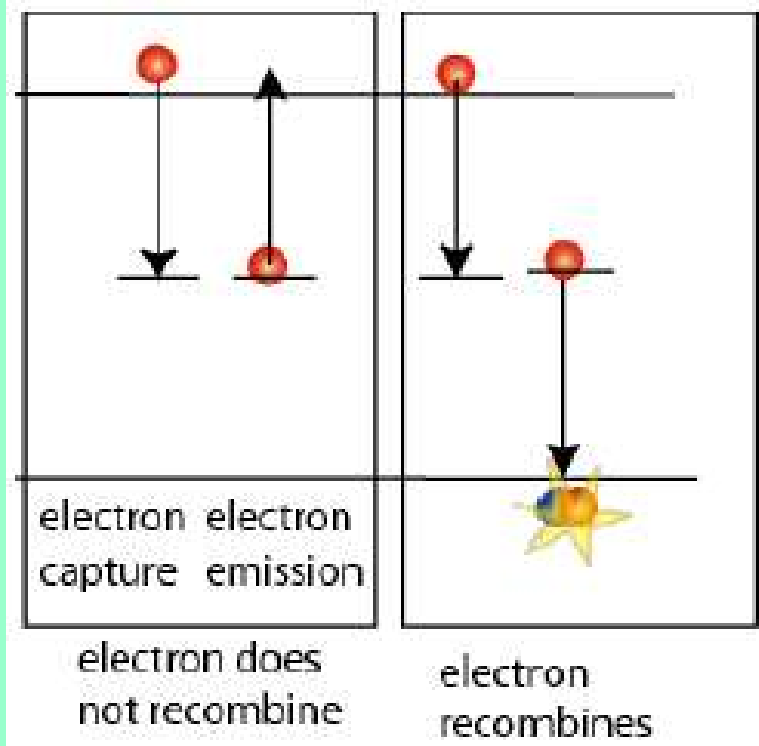


Ricombinazione Auger (non-radiativa)

- come sopra, ma invece dell'emissione di un fotone l'energia viene trasferita ad un altro elettrone in *CB*, la cui energia in eccesso si dissipa termicamente (termalizzazione)
- processo inverso alla ionizzazione da impatto
- processo importante in materiali fortemente drogati

Ricombinazione attraverso difetti

- La ricombinazione attraverso difetti avviene in due fasi ed è detta **ricombinazione SRH** (Shockley-Read-Hall)



- un elettrone in CB viene "intrappolato" in un livello energetico nel "gap" proibito (difetto o drogaggio)
- l'elettrone si può ricombinare con una lacuna in VB se non viene prima riemesso in CB

- se il livello energetico è prossimo ad una soglia di banda la ricombinazione è meno probabile
- sono efficaci i livelli posizionati a metà del gap
- la ricombinazione SRH è tipica nei semiconduttori a gap indiretta

Velocità di Ricombinazione

- la velocità di ricombinazione è in generale data da

$$\frac{dn}{dt} = c_n n p_T \quad \text{ovvero} \quad \frac{dp}{dt} = c_p p n_T$$

- c_n, c_p coefficiente di probabilità del processo
- p_T, n_T numero di stati vuoti disponibili
- n, p concentrazione portatori che si ricombinano

- il tempo di vita τ di un portatore soggetto a ricombinazione SRH è dato da

$$\tau_n = \frac{1}{c_n N_T} \quad \text{ovvero} \quad \tau_p = \frac{1}{c_p N_T}$$

- con N_T concentrazione stati di difetto

Velocità di Ricombinazione SRH

- tenendo conto della probabilità di occupazione della trappola si ottiene dalle relazioni precedenti

$$R = \frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} = \frac{np - n_i^2}{\tau_n (n + n_1) + \tau_p (p + p_1)}$$

- n, p = concentrazioni totali di elettroni e lacune

- n_i = concentrazione intrinseca di portatori

- τ_n, τ_p = tempi di vita dei portatori

- n_1, p_1 = numero di portatori nei livelli trappola

$$n_1 = N_C \exp\left[\frac{(E_T - E_C)}{kT}\right] \quad e \quad p_1 = N_V \exp\left[\frac{(E_V - E_T)}{kT}\right]$$

- in condizioni di bassi livelli di iniezione $\Delta n = n - n_0$ per cui

$$R = \frac{\Delta n}{\tau_n} \quad (\text{tipo } n) \quad e \quad R = \frac{\Delta p}{\tau_p} \quad (\text{tipo } p)$$

Velocità di Ricombinazione

- Riassumendo, la velocità di ricombinazione totale è data da

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{rad}} + \frac{1}{\tau_{SRH}} + \frac{1}{\tau_{Auger}}$$

- in condizioni di equilibrio termico ed allo stato stazionario le velocità di ricombinazione di elettroni e lacune devono essere eguali
- altrimenti non avremmo mai delle concentrazioni di equilibrio (cioè che non variano nel tempo), in contraddizione con la definizione stessa di equilibrio

Equazioni di continuità (della corrente)

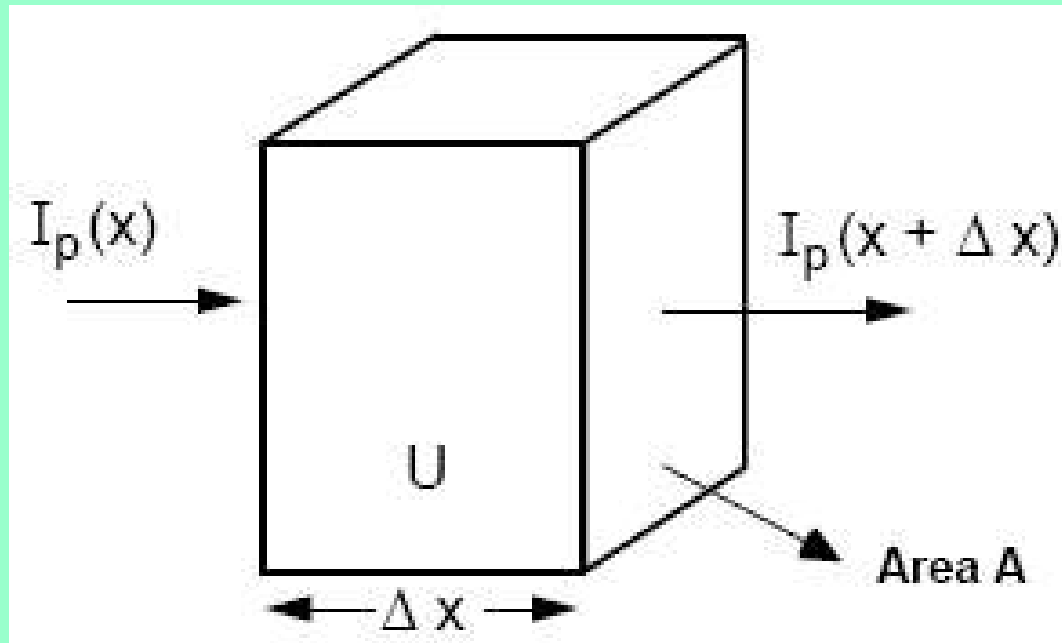
- Combiniamo insieme i risultati dei meccanismi di trasporto

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

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

- con quelli dei fenomeni di ricombinazione e generazione
- Il meccanismo che tiene conto di entrambi è la condizione di **continuità della corrente** (ovvero, la conservazione della carica)

Equazioni di continuità (della corrente)



$$\left(\begin{array}{c} \text{variazione numero} \\ \text{lacune in } \Delta x \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{generazione} \\ \text{lacune in } \Delta x \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{flusso} \\ \text{lacune in } \Delta x \end{array} \right)$$

$$\frac{dp}{dt} A \Delta x = (G - U) A \Delta x + \left\{ \frac{1}{q} I_p(x) - \frac{1}{q} I_p(x + \Delta x) \right\}$$

Equazioni di continuità

$$\frac{dp}{dt} A \Delta x = \left(G - \frac{p - p_0}{\tau_p} \right) A \Delta x + \frac{1}{q} \frac{dI_p}{dx} \Delta x$$

$$\frac{dp}{dt} = \left(G - \frac{p - p_0}{\tau_p} \right) + \frac{1}{qA} \frac{dI_p}{dx}$$

analogamente per gli elettroni

$$\frac{dn}{dt} = \left(G - \frac{n - n_0}{\tau_n} \right) + \frac{1}{qA} \frac{dI_n}{dx}$$

Equazione di Poisson

- oltre alle eq. di continuità, deve essere soddisfatta l'eq. di Poisson

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = \frac{\rho_s}{\epsilon_s}$$

densità di carica spaziale : $\rho_s = q (p - n + N_D^+ - N_A^-)$

con ϵ_s permittività dielettrica del semiconduttore

inoltre essendo $\mathcal{E} = -\frac{dV}{dx}$ si ha

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{q}{\epsilon_s} (n - p + N_A^- - N_D^+)$$

Equazioni generali

- le seguenti relazioni costituiscono un insieme completo di equazioni che descrivono le concentrazioni di portatori e la distribuzione del campo elettrico. Fissate le opportune condizioni al contorno, si possono risolvere per una qualunque struttura (dispositivo)

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = n_p \mu_n \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} + \mu_n \mathcal{E} \frac{\partial n_p}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}$$

$$\frac{\partial p_n}{\partial t} = p_n \mu_p \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} + \mu_p \mathcal{E} \frac{\partial p_n}{\partial x} + D_p \frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} + G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$$

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = \frac{q}{\epsilon_s} (n - p + N_A^- - N_D^+)$$

Modello matematico dei semiconduttori

Equazioni di continuità

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} + (G_n - R_n)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} + (G_p - R_p)$$

Equazioni di trasporto

$$J_n = q\mu_n n\mathbf{E} + qD_n \frac{\partial n}{\partial x}$$

$$J_p = q\mu_p p\mathbf{E} - qD_p \frac{\partial p}{\partial x}$$

Equazione di Poisson

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_s} (N_D^+ - N_A^- + p - n)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial\Phi}{\partial x}$$