

# Optoelettronica – Lezione 6

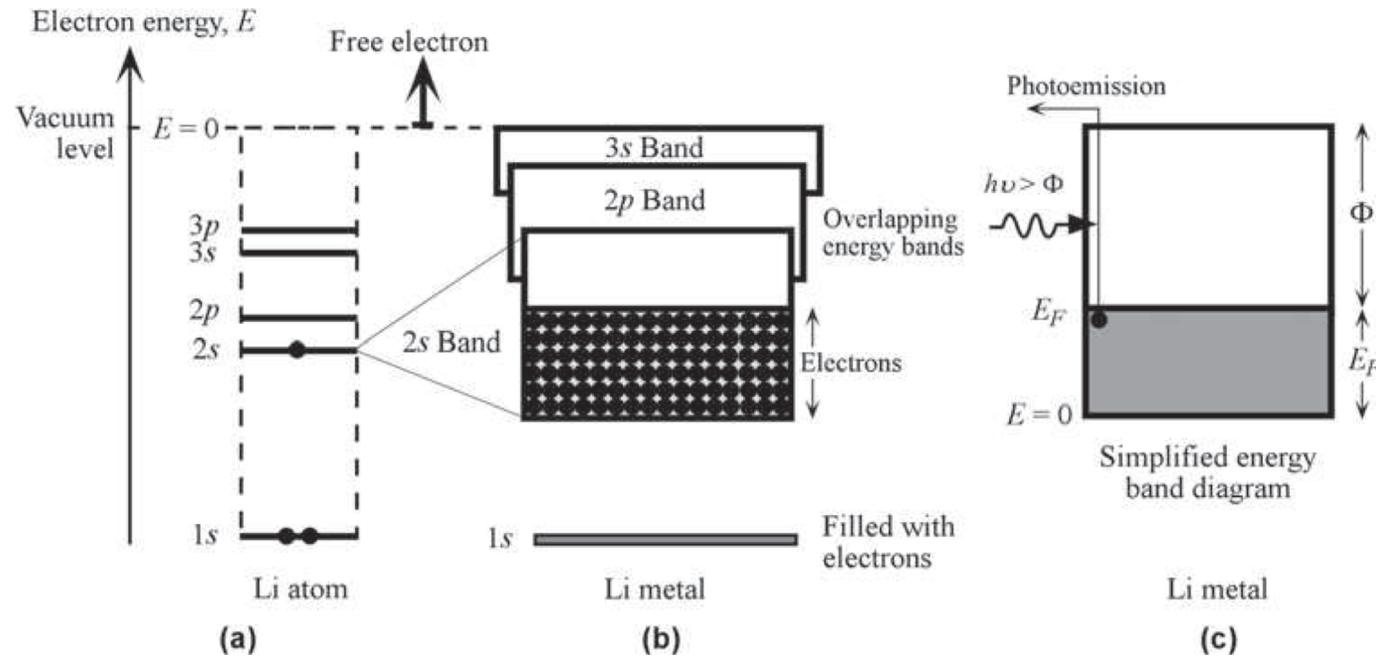
## I semiconduttori

Daniele Ielmini  
Politecnico di Milano

# Outline

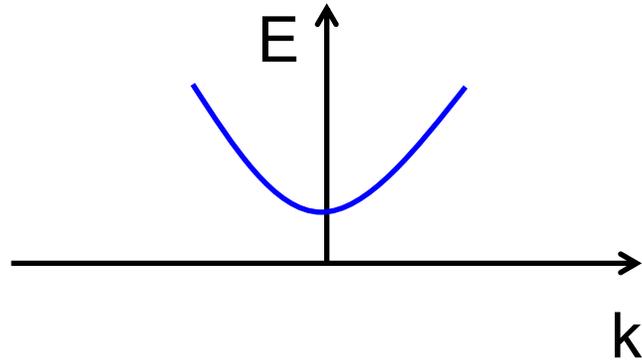
- Struttura a bande
- Drogaggio
- Densità di stati e distribuzione dei portatori
- Ricombinazione e generazione coppie elettrone lacuna
- Gap diretto e gap indiretto

# Struttura a bande dei materiali solidi



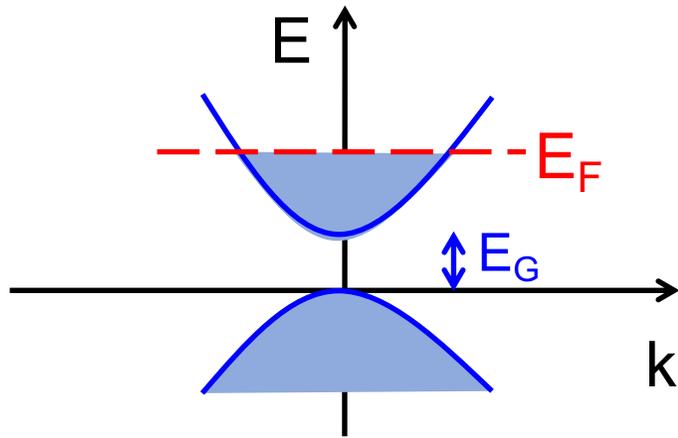
- Li atomico = livelli discreti (orbitali atomici)
- Li metallico = i singoli livelli energetici formano una banda di energia, dove gli elettroni vanno a occupare tutti gli stati a partire dalla minima energia
- Visione semplificata: una singola banda riempita fino a livello caratteristico = energia di Fermi

# Relazione di dispersione dell'elettrone nella banda

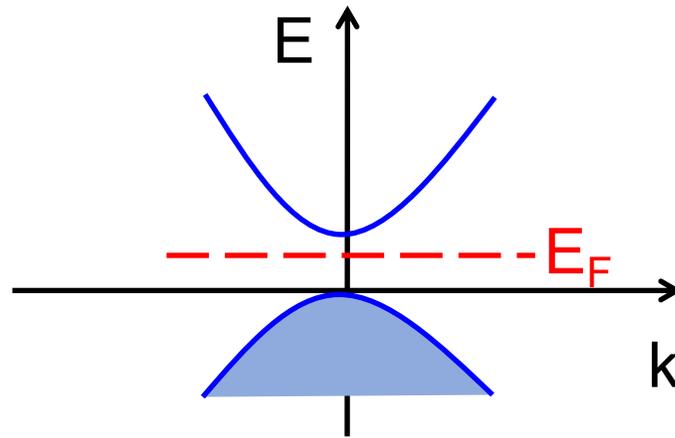


- Fisica quantistica: l'elettrone può essere descritto da una funzione d'onda con una caratteristica lunghezza d'onda  $\lambda$
- Possiamo definire il vettore d'onda dell'elettrone  $k = 2\pi/\lambda$
- Per un elettrone vale la stessa relazione tra momento  $p$  e lunghezza d'onda del fotone, cioè  $p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$
- L'energia dell'elettrone nella banda può essere vista come l'energia cinetica dell'elettrone cioè  $E = \frac{p^2}{2m} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m}$
- La massa  $m$  non è propriamente la massa dell'elettrone, ma una massa efficace ( $m^* > 0$  oppure  $m^* < 0$ ) che descrive l'interazione dell'elettrone con le forze microscopiche all'interno del cristallo

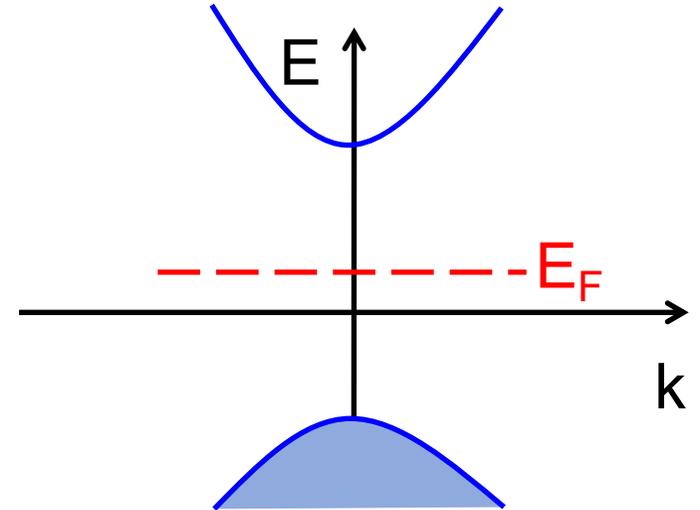
# Banda di valenza e di conduzione



**Metallo**



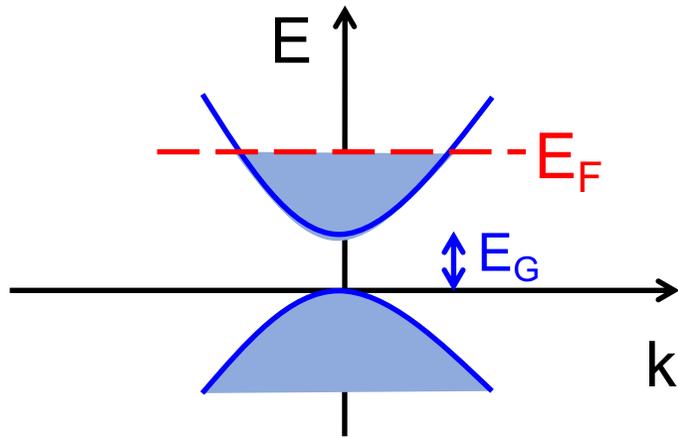
**Semiconduttore**



**Isolante**

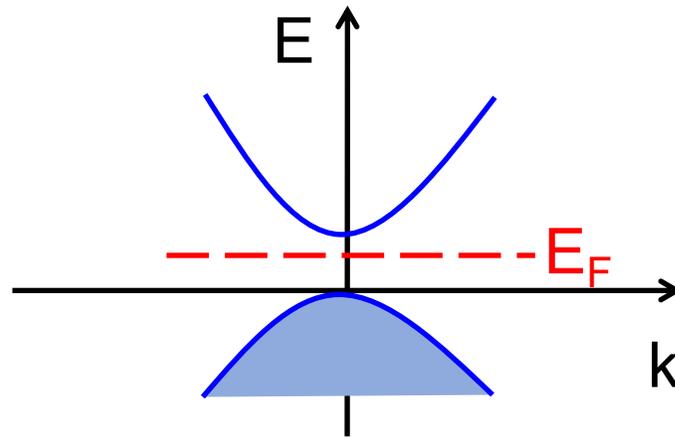
- In generale ci sono diverse bande:
  - Banda di conduzione  $m^* > 0$
  - Banda di valenza  $m^* < 0$
  - Band gap = intervallo proibito di energia
- Metalli, semiconduttori e isolanti differiscono per la posizione del livello di Fermi e per il valore del gap  $E_G$

# Metalli, semiconduttori e isolanti



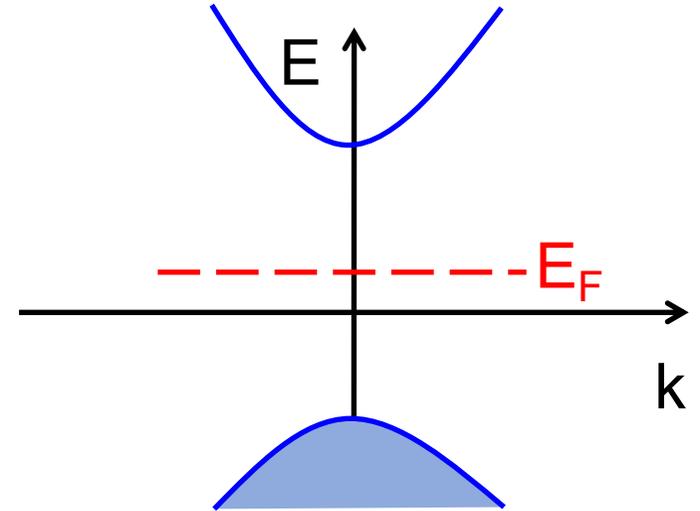
**Metallo**

- Alta conducibilità
- Bassa resistenza R
- $R = R_0 (1 + \alpha \Delta T)$



**Semiconduttore**

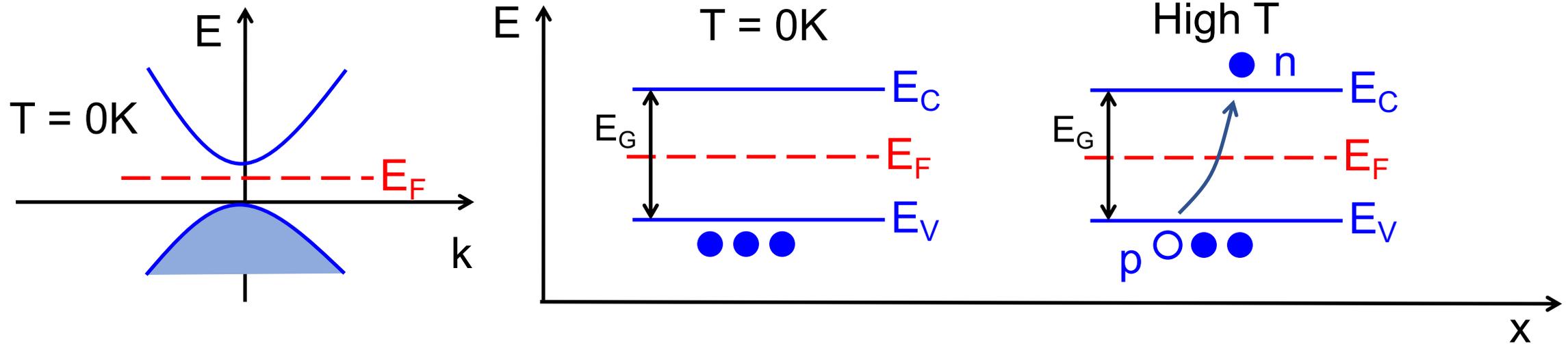
- Intrinseci
  - Conducono solo ad alta T
  - $R = R_0 e^{\frac{E_G}{2kT}}$
- Estrinseci (drogati)
  - Conducibilità dipende dal drogaggio



**Isolante**

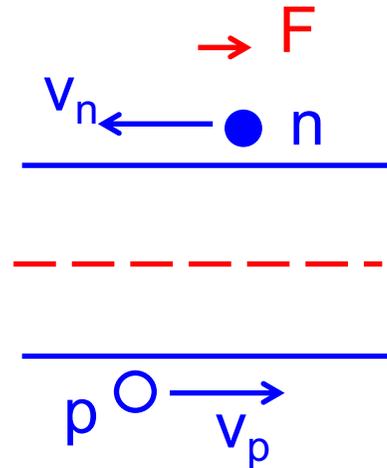
- Bassa conducibilità
- Alta resistenza R

# Semiconduttore intrinseco



- Nella rappresentazione spaziale  $E(x)$ , si riportano solo il minimo della banda di conduzione  $E_C$  ed il massimo della banda di valenza  $E_V$
- Per  $T = 0K$ , banda di valenza tutta piena di elettroni, banda di conduzione tutta vuota
- Ad alta  $T$  si ha **generazione termica** = promozione di elettroni dalla BV alla BC
- Concentrazione portatori  $n = p = n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{E_G}{2kT}}$

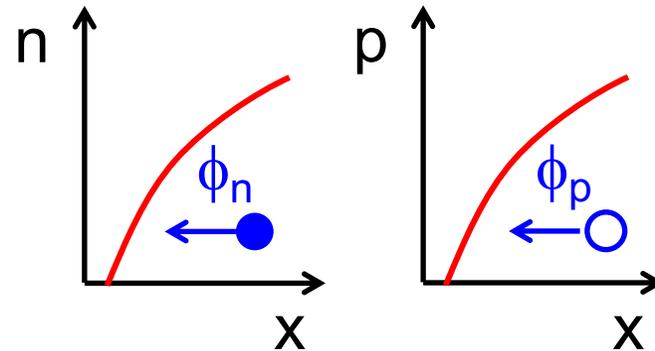
# Meccanismi di trasporto



$$v_n = \mu_n F$$

$$v_p = \mu_p F$$

**Drift**



$$\phi_n = -D_n \frac{dn}{dx}$$

$$\phi_p = -D_p \frac{dp}{dx}$$

**Diffusione**

- Elettroni in BC ( $n$ ) e lacune in BV ( $p$ ) entrambi contribuiscono alla conduzione con due meccanismi fondamentali:
  - Drift (deriva): moto indotto dal campo elettrico
  - Diffusione = effetto del moto casuale (browniano) delle particelle in presenza di concentrazioni variabili con la posizione

# Corrente di drift/diffusion

• Densità di corrente drift elettroni

$$j_n = qn\mu_n F$$

• Densità di corrente drift lacune

$$j_p = qp\mu_p F$$

• Densità di corrente diffusione elettroni

$$j_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

• Densità di corrente diffusione lacune

$$j_p = qD_p \frac{dp}{dx}$$

• Densità di corrente elettroni

$$j_n = qn\mu_n F + qD_n \frac{dn}{dx}$$

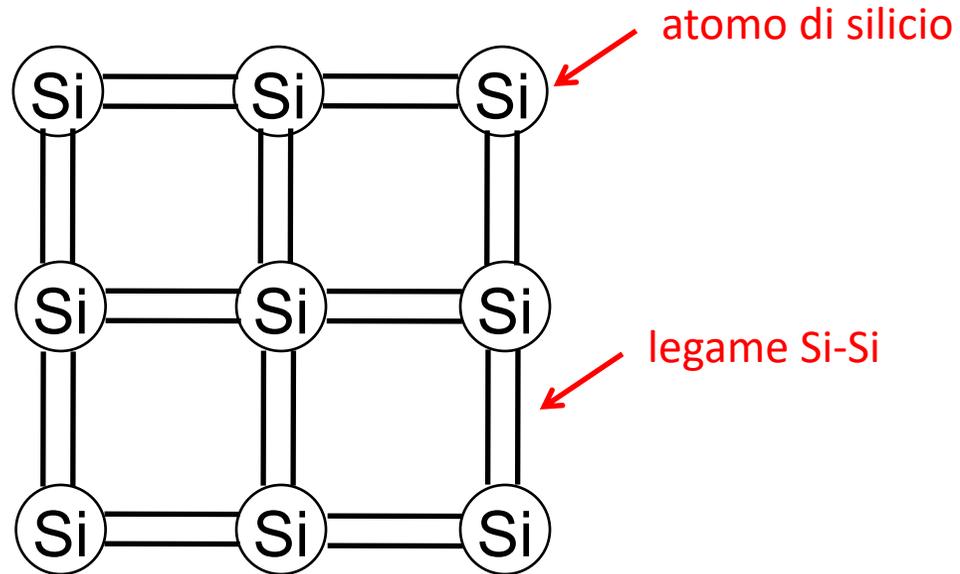
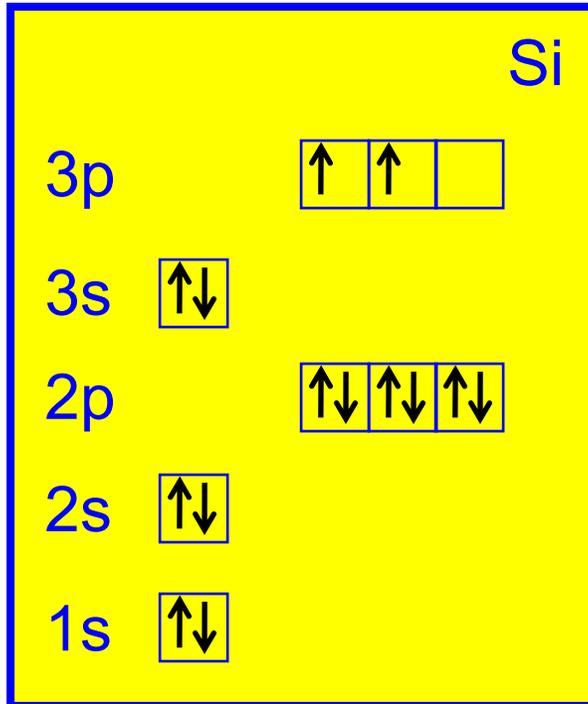
$$D_n = \mu_n \frac{kT}{q}$$

• Densità di corrente lacune

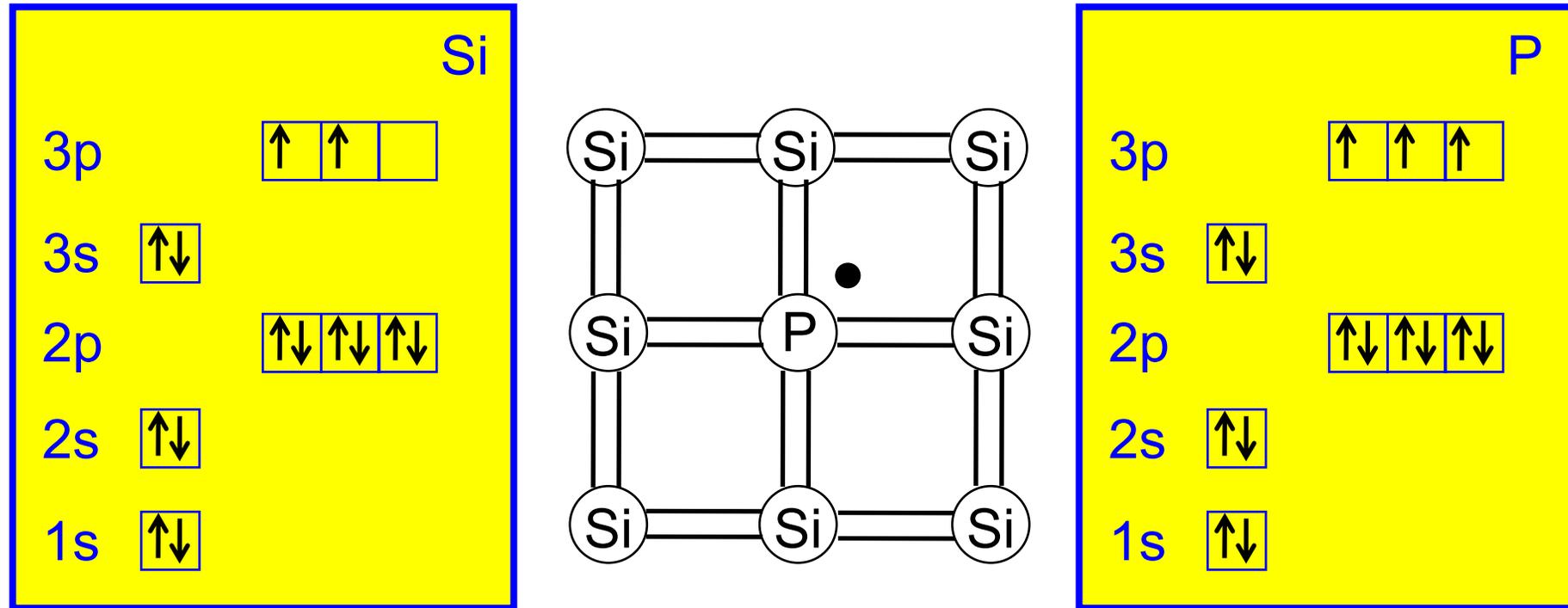
$$j_p = qp\mu_p F + qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$D_p = \mu_p \frac{kT}{q}$$

# Semiconduttori estrinseci

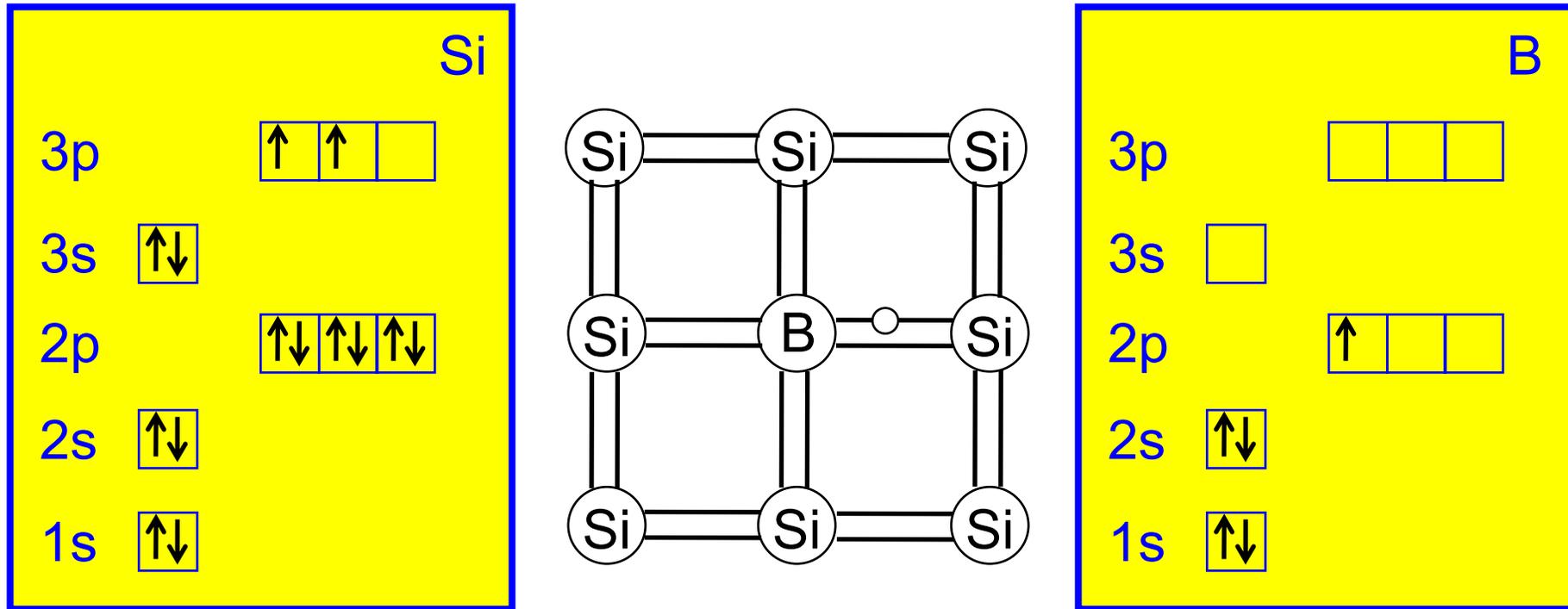


# Drogaggio n



- Di 5 elettroni di valenza del P, 4 vengono spesi per formare i 4 legami della coordinazione tetraedrica, mentre il quinto viene lasciato libero di vagare nel cristallo  $\rightarrow$  P è drogante donore

# Semiconduttore drogato p



- Il B dispone di soli 3 elettroni di valenza: rimane 1 stato di valenza (legame) non riempito da elettrone = lacuna, libera di vagare nel cristallo muovendosi in BV → B è drogante accettore

# Concentrazione di portatori

- Nei semiconduttori estrinseci, il drogaggio è interamente ionizzato → un portatore per ogni atomo drogante ( $n = N_D$  e  $p = N_A$ )
- Tipica concentrazione  $N_A, N_D = 10^{17}-10^{20} \text{ cm}^{-3}$
- All'equilibrio, per semiconduttori non degeneri ( $<10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ), la concentrazione di portatori è data da:

- Concentrazione elettroni  $n = \int_{E_C}^{\infty} g(E)f(E)dE$

- Concentrazione lacune  $p = \int_{-\infty}^{E_V} g(E)(1 - f(E))dE$

- $g(E)$  = densità di stati in BC, BV

- $f(E)$  = distribuzione di Fermi = probabilità di occupazione stato ad energia E

# Densità di stati e distribuzione di Fermi

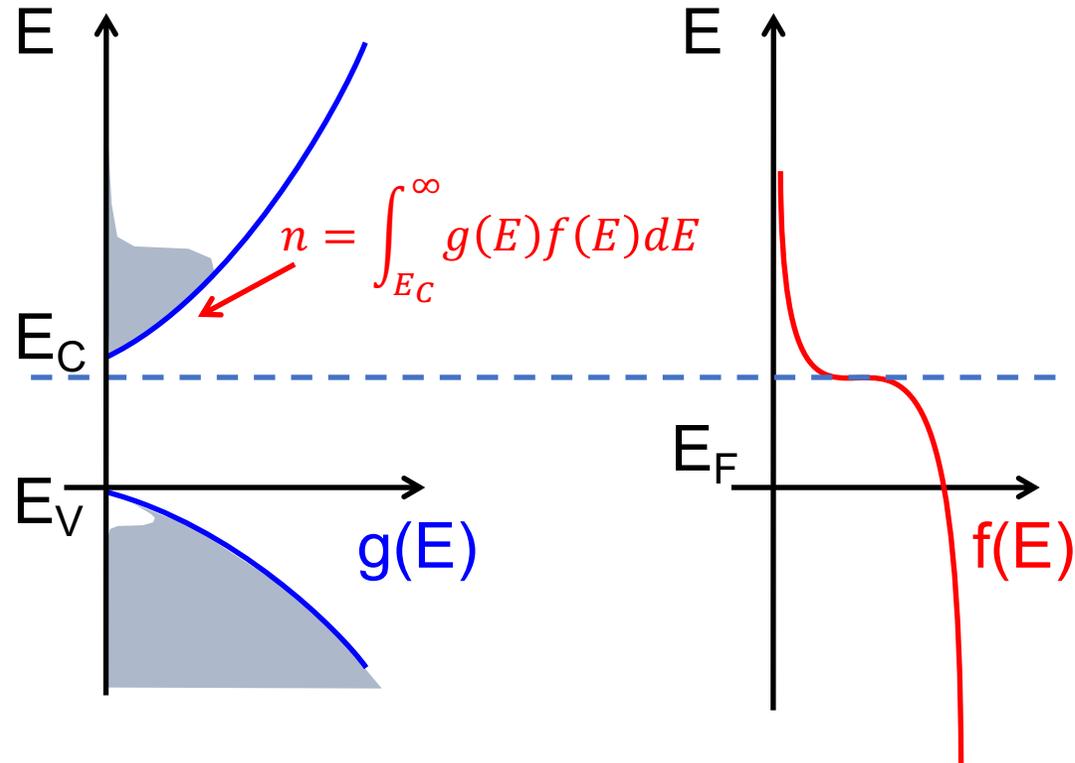
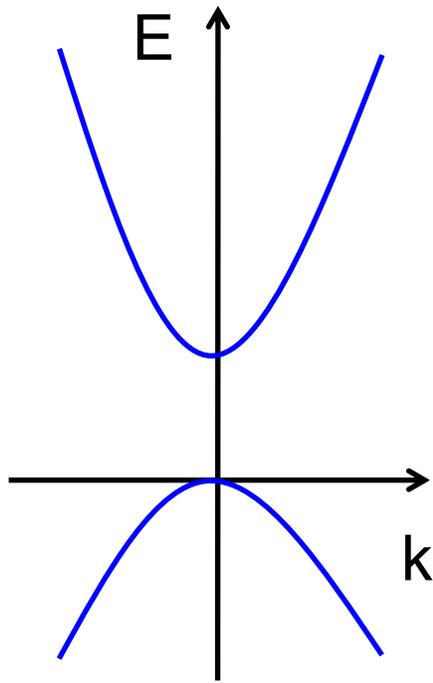
- $g(E)dE$  rappresenta la densità di stati per unità di volume tra  $E$  e  $E+dE$
- In approssimazione parabolica, si ottiene:

- Banda di conduzione: 
$$g(E) = \frac{(2m_n^*)^{\frac{3}{2}}}{2\pi^2 \hbar^3} \sqrt{E - E_C}$$

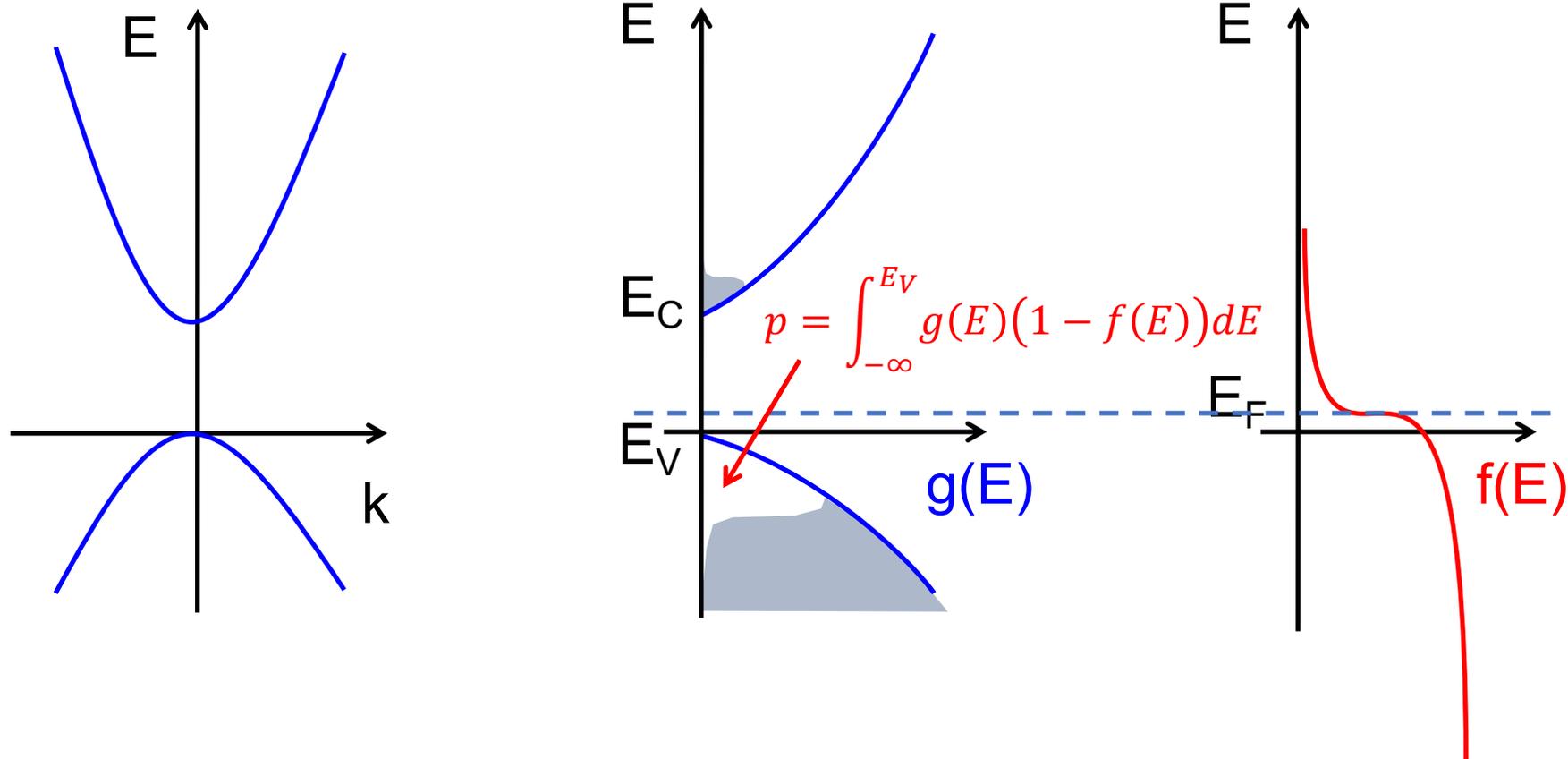
- Banda di valenza: 
$$g(E) = \frac{(2m_p^*)^{\frac{3}{2}}}{2\pi^2 \hbar^3} \sqrt{E_V - E}$$

- Distribuzione di Fermi: 
$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

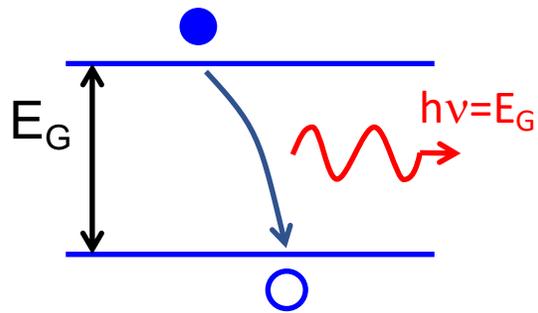
# Distribuzione energetica di elettroni



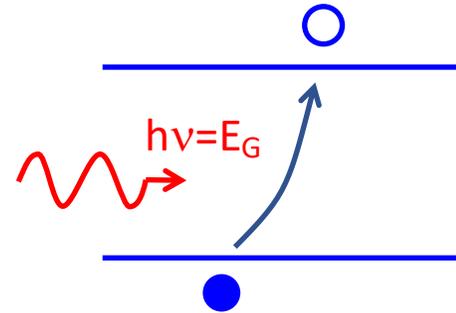
# Distribuzione energetica di lacune



# Ricombinazione e generazione



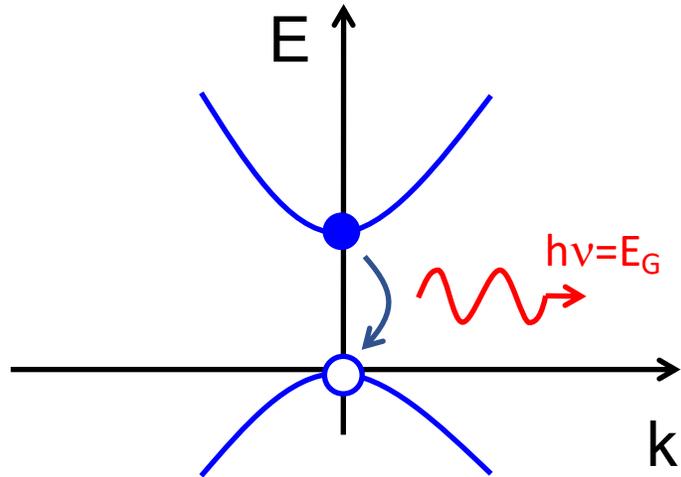
Ricombinazione



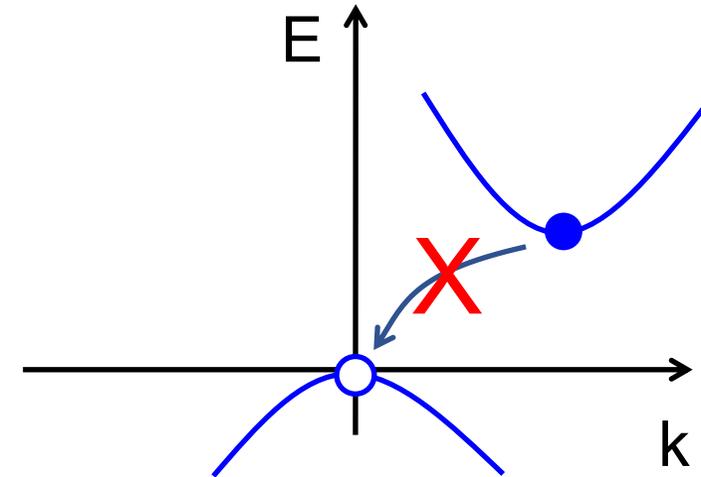
Generazione

- Rate di ricombinazione banda-banda radiativa  $R = Bnp$
- La ricombinazione radiativa è più efficiente nei semiconduttori a gap diretto  $\rightarrow$  semiconduttori gap indiretto mai usati per LED

# Gap diretto e gap indiretto



- Gap diretto: transizione elettrone  $BC \rightarrow BV$  avviene direttamente con l'emissione di un fotone (vettore d'onda  $k_{ph} = 2\pi/\lambda = 8 \times 10^6 \text{ m}^{-1}$  trascurabile)
- Esempio: composti III-V (GaAs, GaP, GaN, InSb, GaSb, InP etc.)



- Gap indiretto: transizione elettrone  $BC \rightarrow BV$  è altamente improbabile perché il fotone non può dare un contributo alla variazione di  $k$ . Richiesto l'intervento di un fonone (vibrazione reticolare)
- Esempio: Si, Ge, GaP