

Situazione simile a quella dei conduttori, ma:

Due tipi di portatori

Entrambi i tipi presenti in ogni semiconduttore

Per i semiconduttori intrinseci:

$$n = p$$

Per i semiconduttori estrinseci:

Maggioritari (*e* per *n*, *h* per *p*)

Minoritari (*h* per *n*, *e* per *p*)

Piu' di un tipo di meccanismo per la corrente:

Drift

Effetto di un campo elettrico

Diffusione

Effetto statistico dovuto a gradienti di concentrazione

Corrente di drift: Caso elettroni

$$\mathbf{J} = \frac{nq^2\tau}{m^*} \mathbf{E} = nq \underbrace{\frac{q\tau}{m^*}}_{\rho_e} \underbrace{\mathbf{E}}_{\mathbf{v}_e}, \text{ analogo a conduttori (v. prima)}$$

$$\rightarrow \mathbf{v}_e = \mu_n \mathbf{E}, \quad \mu_e \text{ mobilita' di elettroni}$$

Analogo per lacune

$$\rightarrow \mu = \frac{q\tau}{m^*}$$

$$\rightarrow \mathbf{j} = q(p\mu_h + n\mu_e) \mathbf{E}$$

Conduttivita', resistivita':

$$\sigma = q(p\mu_p + n\mu_n)$$

$$\rho = \frac{1}{q(p\mu_p + n\mu_n)}$$

Resistivita' $\propto 1/\mu$: piu' μ e' piccolo, piu' grande e' ρ

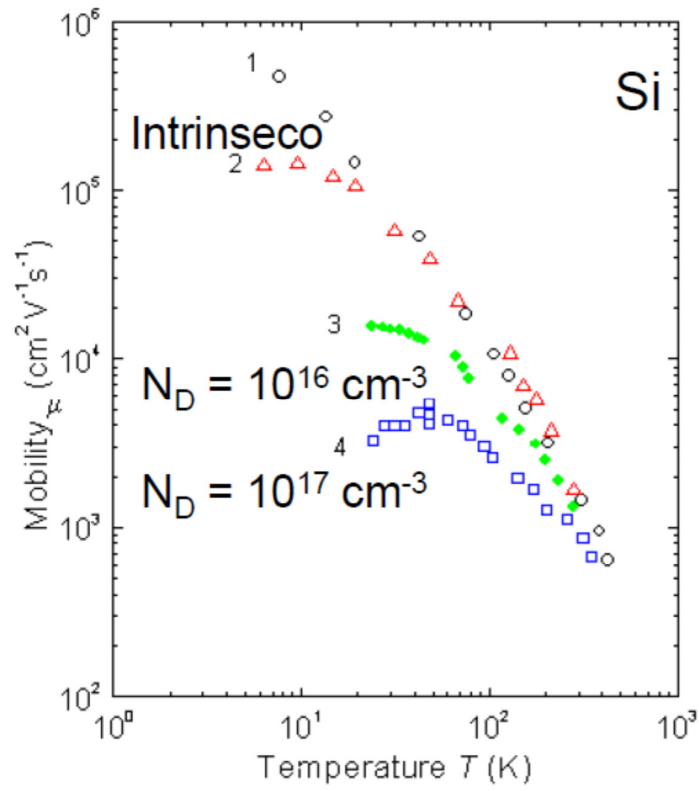
→ Con diversi contributi, domina il piu' piccolo

→ Mobilita' si combinano come resistenze in parallelo

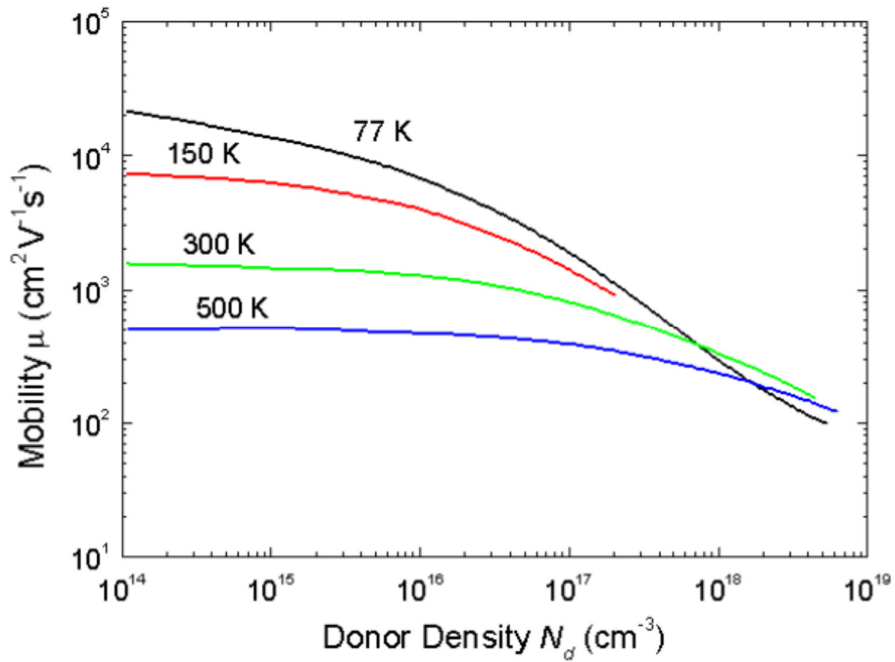
$$\rightarrow \frac{1}{\mu_n} = \frac{1}{\mu_{n1}} + \frac{1}{\mu_{n2}} + \dots, \quad \frac{1}{\mu_p} = \frac{1}{\mu_{p1}} + \frac{1}{\mu_{p2}} + \dots$$

| | μ_n [$\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$] | μ_p [$\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$] |
|------|---|---|
| Si | 1360 | 460 |
| GaAs | 8000 | 320 |

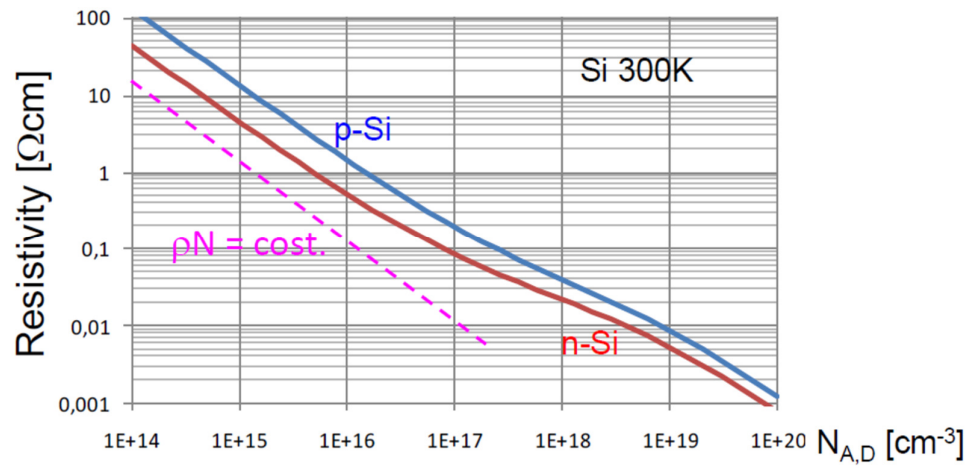
Mobilita' vs T



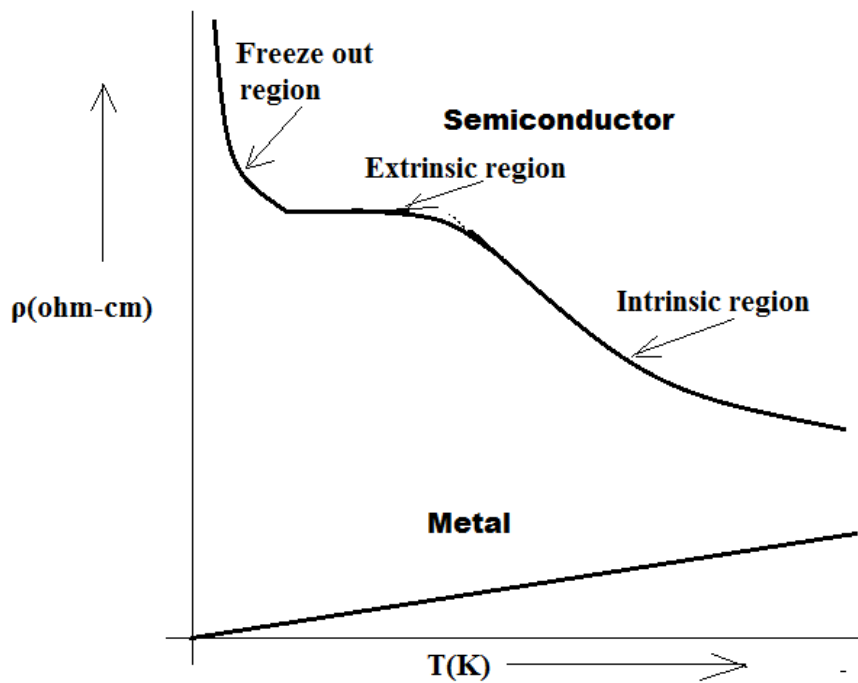
Mobilita' vs concentrazione



Resistività vs concentrazione

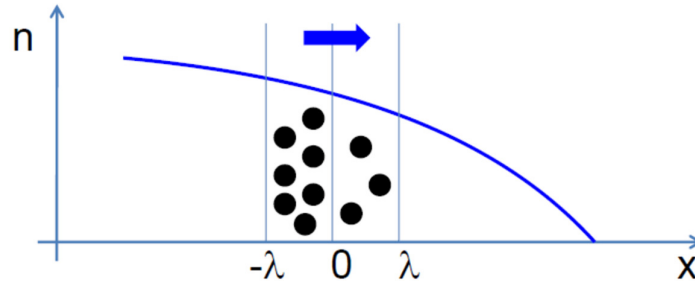


Resistività vs temperatura



Corrente di diffusione: Effetto statistico

Concentrazione non uniforme \rightarrow Flusso netto



$$\phi = nv$$

$$\phi = \phi_{\rightarrow} - \phi_{\leftarrow} = -\frac{1}{2}v_t \left[n\left(+\frac{\lambda}{2}\right) - n\left(-\frac{\lambda}{2}\right) \right]$$

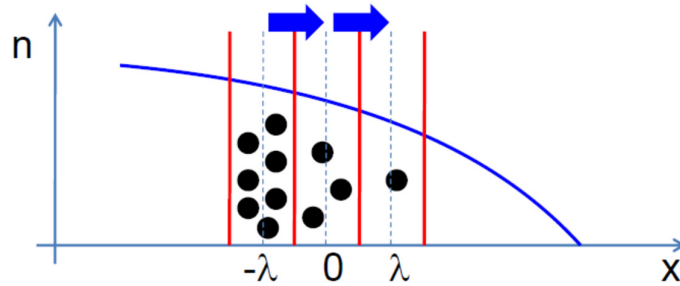
$$\rightarrow \phi \approx -\frac{1}{2}v_t \left[n(0) + \left. \frac{dn}{dx} \right|_0 \frac{\lambda}{2} - \left(n(0) + \left. \frac{dn}{dx} \right|_0 \left(-\frac{\lambda}{2} \right) \right) \right]$$

$$\rightarrow \phi \approx -\frac{1}{2}v_t \lambda \frac{dn}{dx} = -D_n \frac{dn}{dx} \quad \text{Prima legge di Fick}$$

$$\left. \begin{array}{l} D_n = \frac{1}{2}v_t \lambda \\ \lambda = v_t \tau \\ kT = \frac{1}{2}m^* v_t^2 \end{array} \right\} \rightarrow D_n = \frac{1}{2}v_t^2 \tau = \frac{kT}{m^*} \tau = \frac{kT}{q} \frac{q\tau}{m^*}$$

$$\rightarrow D_n = \frac{kT}{q} \mu_n \quad \text{Relazione di Einstein}$$

Concentrazione non uniforme: Variazione nel tempo



Differenza di flusso (+vo da sinistra a destra):

Entrante $\left(-\frac{\lambda}{2}\right)$ - Uscente $\left(+\frac{\lambda}{2}\right)$ = In/De-cremento contenuto scatola lunga λ

$$\phi\left(-\frac{\lambda}{2}\right) - \phi\left(+\frac{\lambda}{2}\right) = \frac{dn}{dt} \lambda \quad \text{eq. di continuita'}$$

$$\phi \approx -\frac{1}{2} v_t \lambda \frac{dn}{dx} = -D_n \frac{dn}{dx} \quad (\text{v. prima})$$

Sviluppo in serie di Taylor per $\frac{dn}{dx}$:

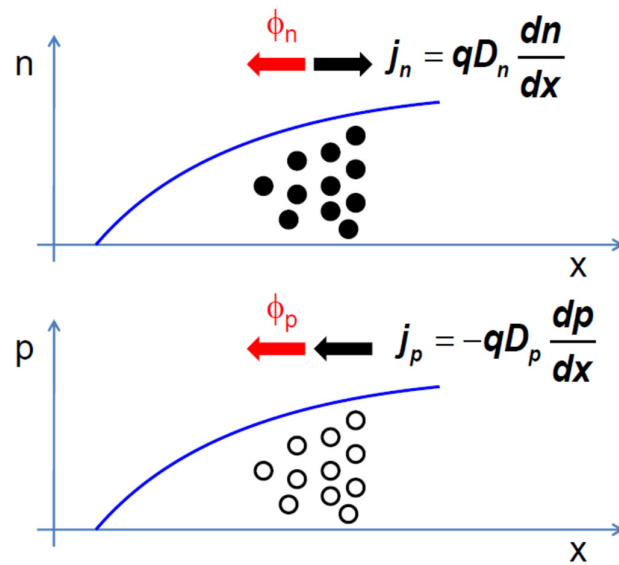
$$\rightarrow \left(-D_n \frac{dn}{dx} \Big|_{-\frac{\lambda}{2}} \right) - \left(-D_n \frac{dn}{dx} \Big|_{+\frac{\lambda}{2}} \right) = D_n \left[\underbrace{\frac{dn}{dx} \Big|_0 + \frac{d^2n}{dx^2} \Big|_0 \frac{\lambda}{2}}_{\sim \frac{dn}{dx} \Big|_{+\frac{\lambda}{2}}} - \underbrace{\frac{dn}{dx} \Big|_0 + \frac{d^2n}{dx^2} \Big|_0 \left(-\frac{\lambda}{2}\right)}_{\sim \frac{dn}{dx} \Big|_{-\frac{\lambda}{2}}} \right]$$

$$\rightarrow D_n \frac{d^2n}{dx^2} \Big|_0 \lambda = \frac{dn}{dt} \lambda$$

$$\rightarrow D_n \frac{d^2n}{dx^2} = \frac{dn}{dt} \quad \text{Seconda legge di Fick}$$

Equazione della diffusione \equiv Equazione del calore

Concentrazione non uniforme: Corrente di diffusione

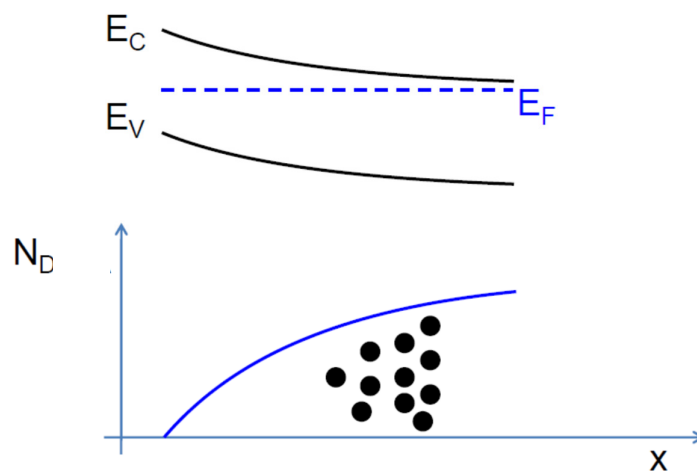


Concentrazione non uniforme:

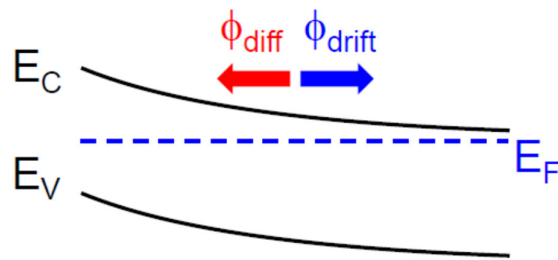
$$n(x) = N_D(x) = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}} \rightarrow E_C(x) = E_F + kT \ln \frac{N_C}{N_D(x)}$$

Livello di Fermi costante (\leftarrow Sistema in equilibrio)

$\rightarrow E_C = E_C(x)$ Band bending



Concentrazioni non uniformi: Corrente totale
Drift + Diffusione



$$j_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx} = 0$$

$$E = -\frac{dV}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_c}{dx}$$

$$\rightarrow j_n = n\mu_n \frac{dE_c}{dx} + qD_n \frac{dn}{dx} = 0$$

Ritroviamo la relazione di Einstein:

$$n = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{kT}} \rightarrow E_C = -kT \ln \frac{n}{N_C} + E_F$$

$$\rightarrow \frac{dE_c}{dx} = -kT \frac{d(\ln n)}{dx}$$

$$\rightarrow j_n = -n\mu_n kT \frac{d(\ln n)}{dx} + qD_n \frac{dn}{dx} = 0$$

$$\rightarrow j_n = -\mu_n kT \frac{dn}{dx} + qD_n \frac{dn}{dx} = 0$$

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

Correnti in un semiconduttore:

Elettroni

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

Lacune

$$j_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$$

Totale:

$$j = j_n + j_p = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx} + qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$$

In 3D:

$$\mathbf{j} = qn\mu_n \mathbf{E} + qD_n \nabla n + qp\mu_p \mathbf{E} - qD_p \nabla p$$