

Legge dell'azione di massa

➤ in equilibrio (condizioni stazionarie)

$$G = R \quad \Rightarrow \quad np = \frac{f_1(T)}{f_2(T)} = n_i p_i$$

$n_i = p_i =$ concentrazione intrinseca di elettroni (la cune)

$$n_i^2 = np = N_C e^{-(E_C - E_f)/kT} N_V e^{-(E_f - E_V)/kT}$$

$$= N_C N_V e^{-(E_C - E_V)/kT} =$$

$$= N_C N_V e^{-E_g/kT}$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-E_g/2kT}$$

Legge dell'azione di massa

- n_i è funzione di T ed E_g . Sostituendo l'espressione di E_g

$$n_i = 3.87 \times 10^{16} T^{3/2} e^{-(1.21 - \Delta E_g)/2kT}$$

essendo $\Delta E_g = 7.1 \times 10^{-10} \sqrt{n_i/T}$

per il Si $E_g = 1.21 \text{ eV}$ a $T = 0^\circ \text{K}$

$$n_i \approx 1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ per Si a } T = 25^\circ \text{C}$$

- n_i è il parametro che determina le condizioni operative di un materiale semiconduttore (cioè il drogaggio deve essere $\gg n_i$)

Livello di Fermi intrinseco

- dovendo essere $n_i = n = p$ sulla base delle relazioni

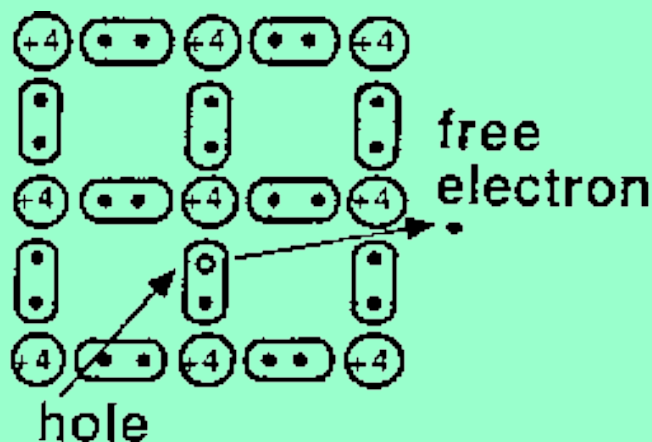
$$n = N_C e^{-(E_c - E_i)/kT} \quad \text{con} \quad N_C = \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$p = N_V e^{-(E_i - E_v)/kT} \quad \text{con} \quad N_V = \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2} \right)^{3/2}$$

$$E_i = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_p}{m_n} \right) \approx \frac{E_c + E_v}{2}$$

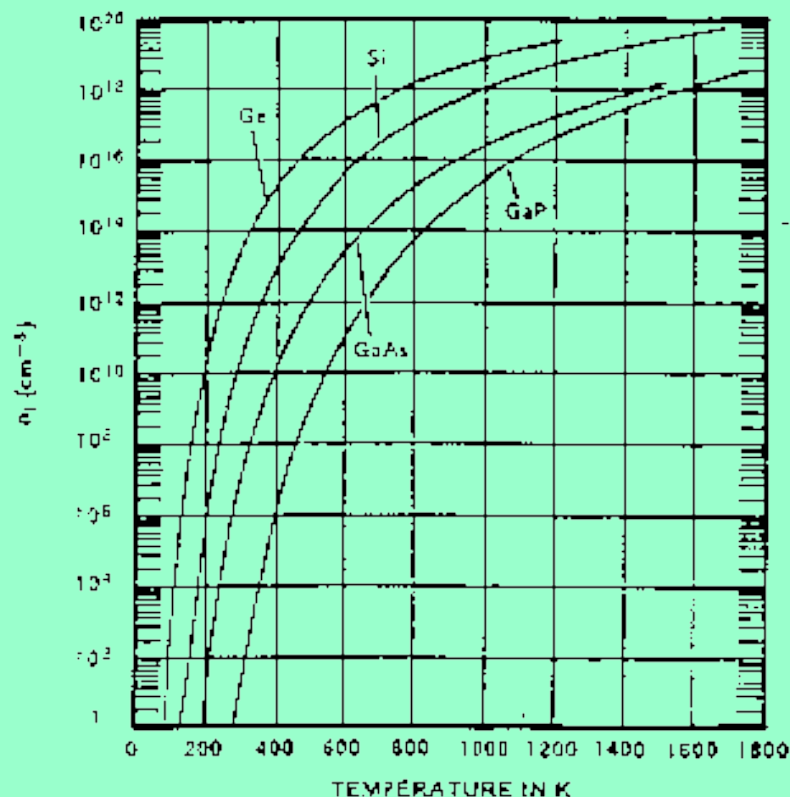
- E_i rappresenta il valore assunto dal livello di Fermi E_f in un semiconduttore intrinseco (cioè non drogata)

Silicio intrinseco (non-drogato)



Covalent (shared e^-) bonds exist between Si atoms in a crystal. Since the e^- are loosely bound, some will be free at any T, creating hole electron pairs.

una lacuna (hole = mancanza di carica negativa) è assimilabile ad una carica positiva mobile !



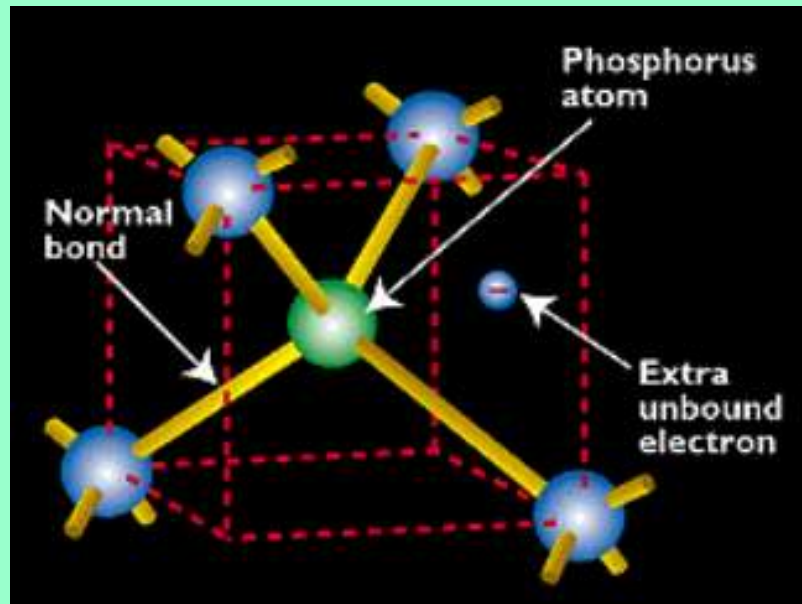
$$\text{Si: } n_i = 3.9 \times 10^{16} T^{3/2} e^{-\frac{0.605\text{eV}}{kT}} / \text{cm}^3$$

$$n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3} \text{ a RT}$$

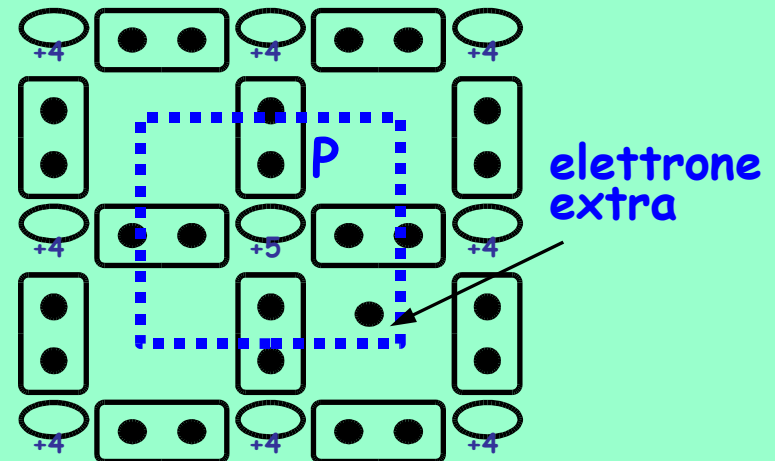
Drogaggio di tipo n

Sostituendo un atomo di silicio con un atomo di elementi della V colonna del sistema periodico si crea un elettrone di conduzione.

Donori: P, As, Sb



rappresentazione 2D



Donore

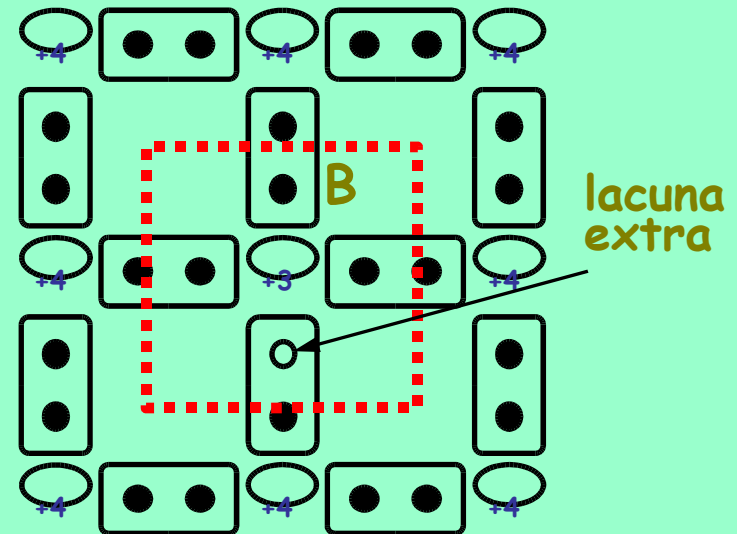
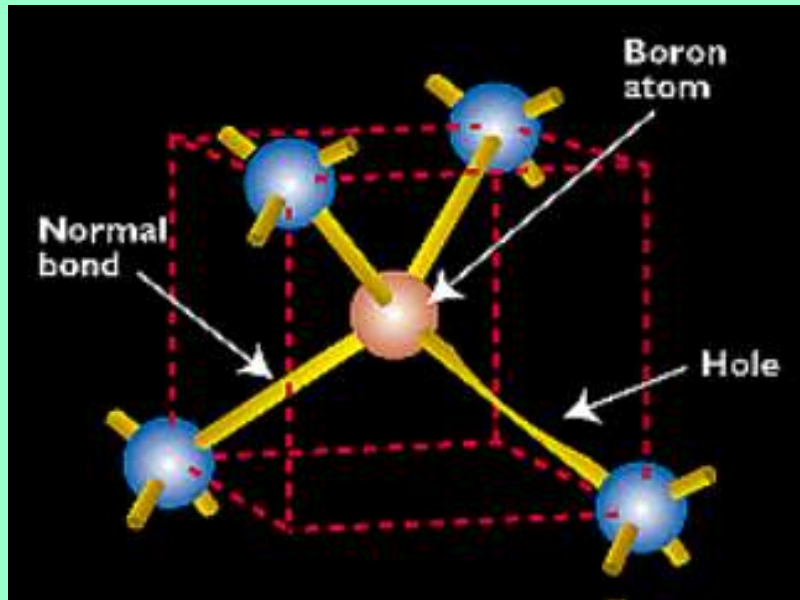
I droganti sono aggiunti per controllare le proprietà elettroniche del materiale. A temperatura ambiente (RT) tutti i donori sono ionizzati e cresce la conducibilità elettrica. Concentrazioni tipiche vanno da 10^{14} cm^{-3} a 10^{20} cm^{-3} .

Drogaggio di tipo p

Sostituendo un atomo di silicio con un atomo di un elemento della III colonna del sistema periodico si crea una lacuna.

Accettori: B, In, Al, Ga

rappresentazione 2D



Accettore

I droganti sono aggiunti per controllare le proprietà elettroniche del materiale. A temperatura ambiente (RT) tutti gli accettori sono ionizzati e cresce la conducibilità elettrica. Concentrazioni tipiche vanno da 10^{14} cm^{-3} a 10^{20} cm^{-3} .

Drogaggio: livello di Fermi estrinseco

- N_d^+ = densità di donori ionizzati (densità di livelli E_d non occupati da elettroni, finiti in banda di conduzione)
- N_a^+ = densità di accettori ionizzati (densità di livelli E_a occupati da elettroni che creano lacune in banda di valenza)



Livello di Fermi estrinseco

➤ dalla condizione di neutralità della carica

$$n + N_a^- = p + N_d^+ \quad \text{essendo}$$

$$N_d^+ = N_d (1 - f_D(E)) = \frac{N_d}{1 + e^{(E_f - E_d)/kT}}$$

$$N_a^- = N_a f_D(E) = \frac{N_a}{1 + e^{(E_a - E_f)/kT}}$$

se $E_a = E_f = E_d$ (ovvero T elevate)

$N_d^+ \approx N_d$ e $N_a^- \approx N_a$ quindi $n + N_a = p + N_d$ ed essendo $np = n_i^2$

$$n = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(N_d - N_a)^2 + 4n_i^2} + (N_d - N_a) \right] \approx (N_d - N_a) \quad \text{per } (N_d - N_a) \gg n_i$$

per il silicio di tipo n

Livello di Fermi estrinseco

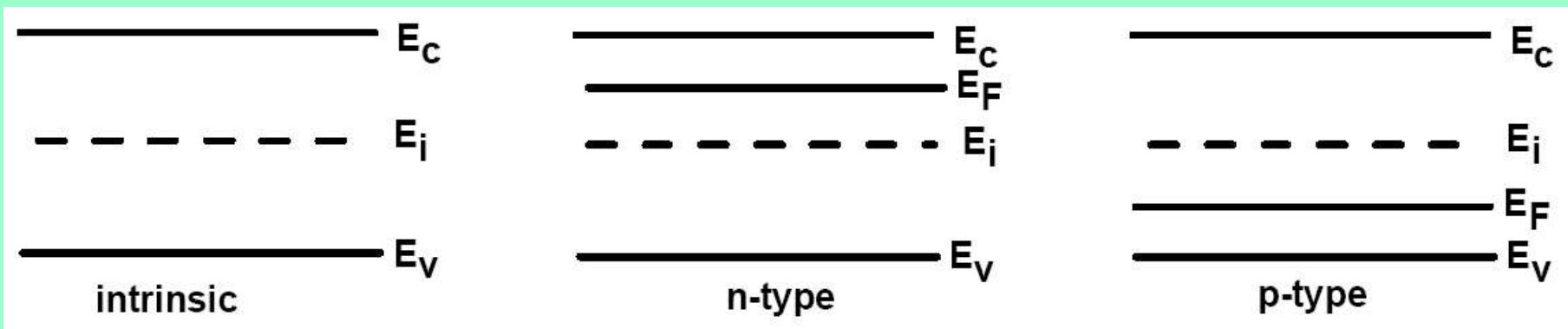
➤ poichè deve comunque sempre essere valida la relazione

$$n = N_C e^{-(E_c - E_f)/kT} = N_C e^{-(E_c - E_i)/kT} e^{-(E_i - E_f)/kT} = n_i e^{-(E_i - E_f)/kT} \text{ da cui}$$

$$E_f = E_i + kT \ln \frac{n}{n_i}$$

analogamente $p = \frac{1}{2} \left[\sqrt{(N_a - N_d)^2 + 4n_i^2} + (N_a - N_d) \right] \approx (N_a - N_d)$

$p = n_i e^{-(E_f - E_i)/kT}$ e, quindi $E_f = E_i + kT \ln \frac{p}{n_i}$ per il silicio di tipo p



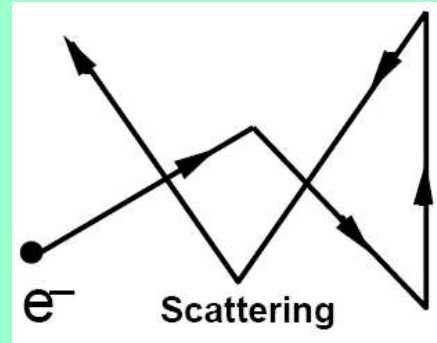
Trasporto dei portatori

➤ all'equilibrio termico gli elettroni in banda di conduzione (le lacune in banda di valenza) si muovono per agitazione termica

➤ energia termica = $\frac{3}{2}kT$ (k costante di Boltzmann)

$$\frac{1}{2}m_n v_{th}^2 = \frac{3}{2}kT \quad v_{th} = \text{velocità termica} \approx 10^7 \text{ cm/sec a } 300K$$

➤ in equilibrio termico il moto è casuale e la corrente totale è nulla



➤ gli eventi di diffusione (scattering) hanno diversa origine

Meccanismi di scattering

- scattering da fononi: gli atomi vibrano intorno alle posizioni reticolari. In meccanica quantistica le vibrazioni sono quantizzate (fononi). Il trasferimento di energia dagli elettroni al reticolo è chiamato scattering fononico.
- scattering da impurezze ionizzate (importante ad elevate concentrazioni di drogaggio)
- scattering da impurezze neutre (trascurabile)
- scattering elettrone-elettrone e elettrone-lacuna (importante ad elevate concentrazioni di portatori)
- scattering da difetti cristallini (importante in materiali policristallini)
- scattering di superficie (importante in dispositivi tipo MOS, molto sottili).

Libero cammino medio

- distanza media tra le collisioni = libero cammino medio l_m

$$l_m \approx \text{da } 10\text{nm} \text{ a } 1\mu\text{m in Si}$$

$$v_{th} = \text{velocità termica} \approx 10^7 \text{ cm/sec a } 300\text{K}$$

$$\tau_c \approx \frac{10^{-5} \text{ cm}}{10^7 \text{ cm/sec}} \approx 1 \text{ psec}$$

- La maggior parte dei processi di ricombinazione e trasporto avvengono su tempi liberi medi (o liberi cammini medi) molto più lunghi di 1 psec, il che permette di trattare le situazioni di non-equilibrio come perturbazioni dell'equilibrio termico

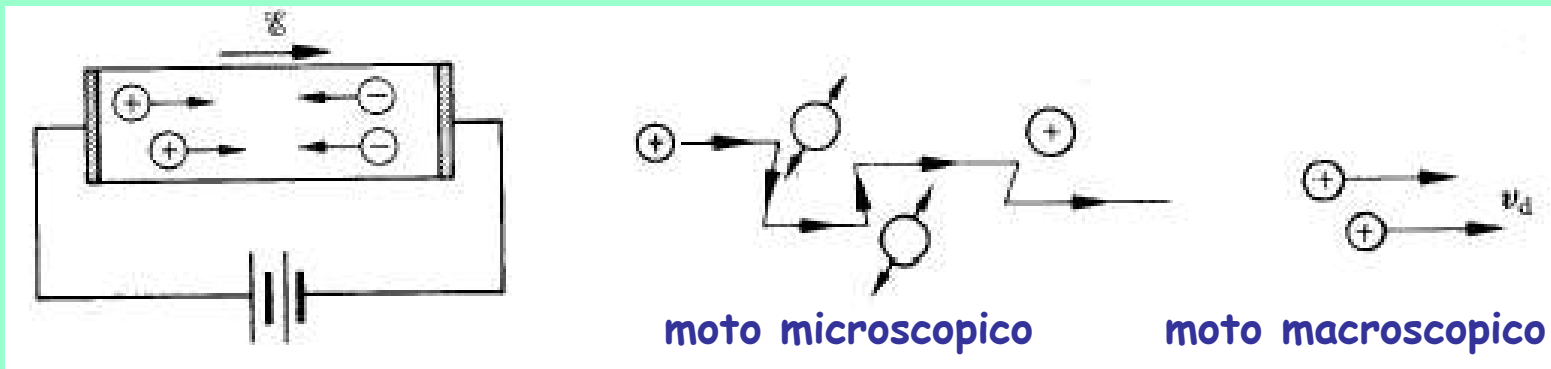
Moto di trascinamento

- applicando un campo elettrico \mathcal{E} , una forza $-q\mathcal{E}$ agirà sull'elettrone ($+q\mathcal{E}$ sulla lacuna) nell'intervallo di tempo che intercorre tra due urti
- eguagliando l'impulso (forza \times tempo), acquisito dall'elettrone tra due urti, alla sua quantità di moto

$$-q\mathcal{E}\tau_c = m_n v_n \Rightarrow v_n = -\left(\frac{q\tau_c}{m_n}\right)\mathcal{E} \text{ da cui } v_n = -\mu_n\mathcal{E}$$

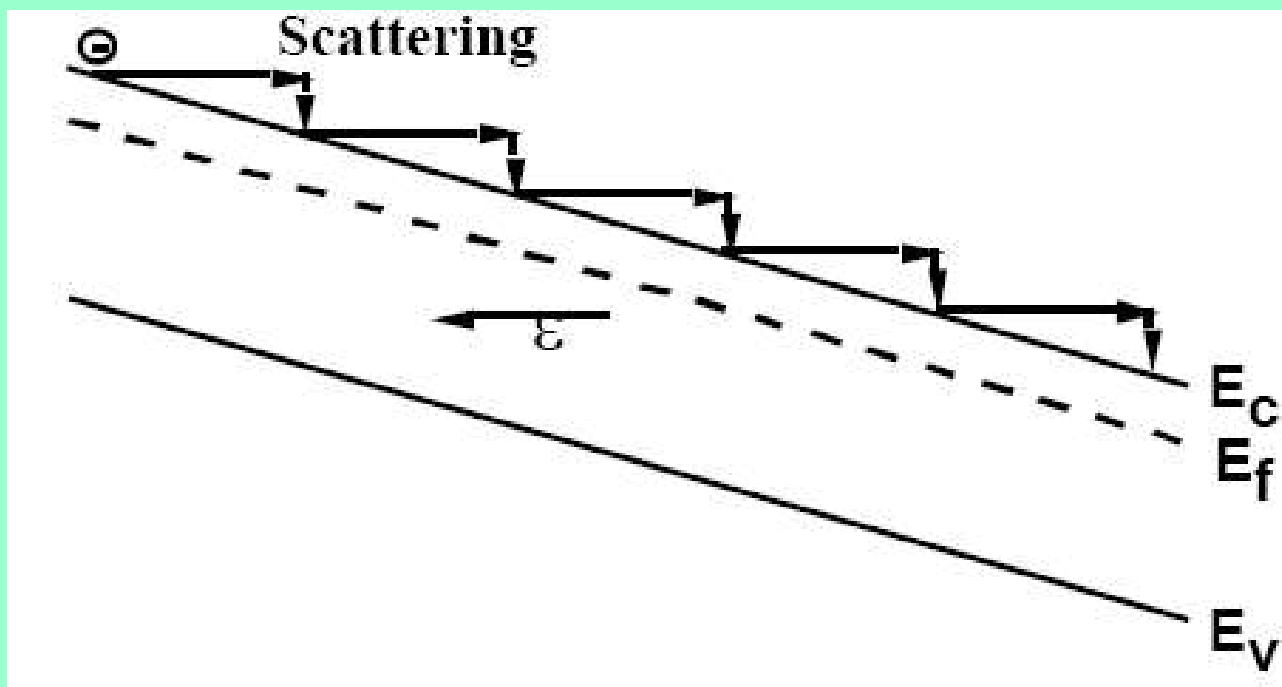
$$\mu_n = \frac{q\tau_c}{m_n} \text{ mobilità dell'elettrone } \left(\frac{\text{cm}^2}{\text{Vgsec}}\right)$$

analogamente $v_p = \mu_p\mathcal{E}$



Moto di trascinamento

- la mobilità è legata direttamente al tempo libero medio tra collisioni τ_c , che è determinato dai vari meccanismi di scattering
- il moto degli elettroni, in media, avviene lungo una direzione opposta ad E (moto di trascinamento "drift")



Mobilità

- La relazione lineare tra μ ed \mathcal{E} , vale solo per campi relativamente deboli
- Per campi elevati $v_d \sim v_{th}$ e v_d "satura" al valore

v_{sat} = *velocità limitata dallo scattering*

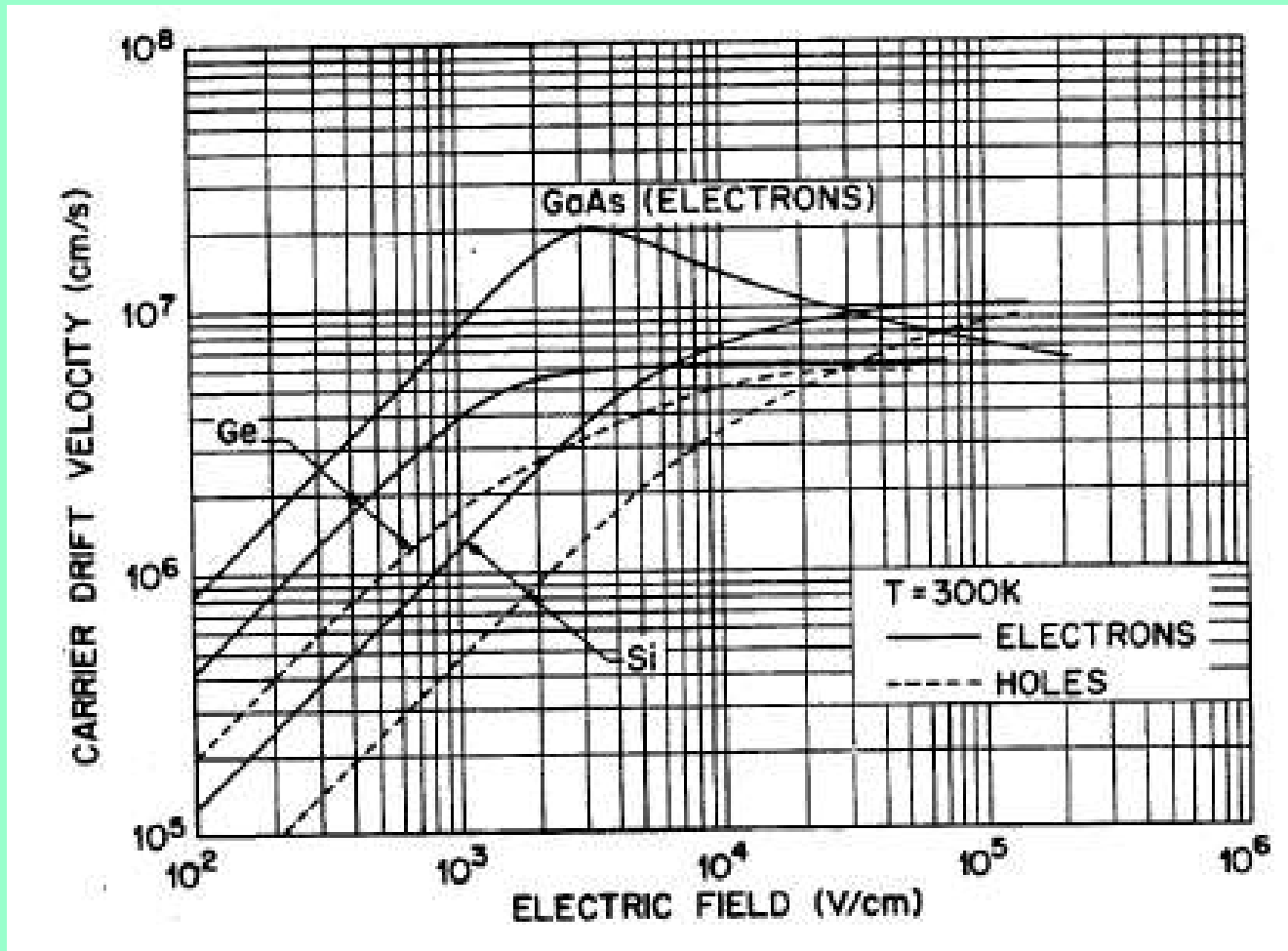
$\approx 10^7$ *cm/sec per elettroni in Si*

$\approx 6 \times 10^6$ *cm/sec per lacune in Si*

Il campo critico a cui avviene la saturazione vale

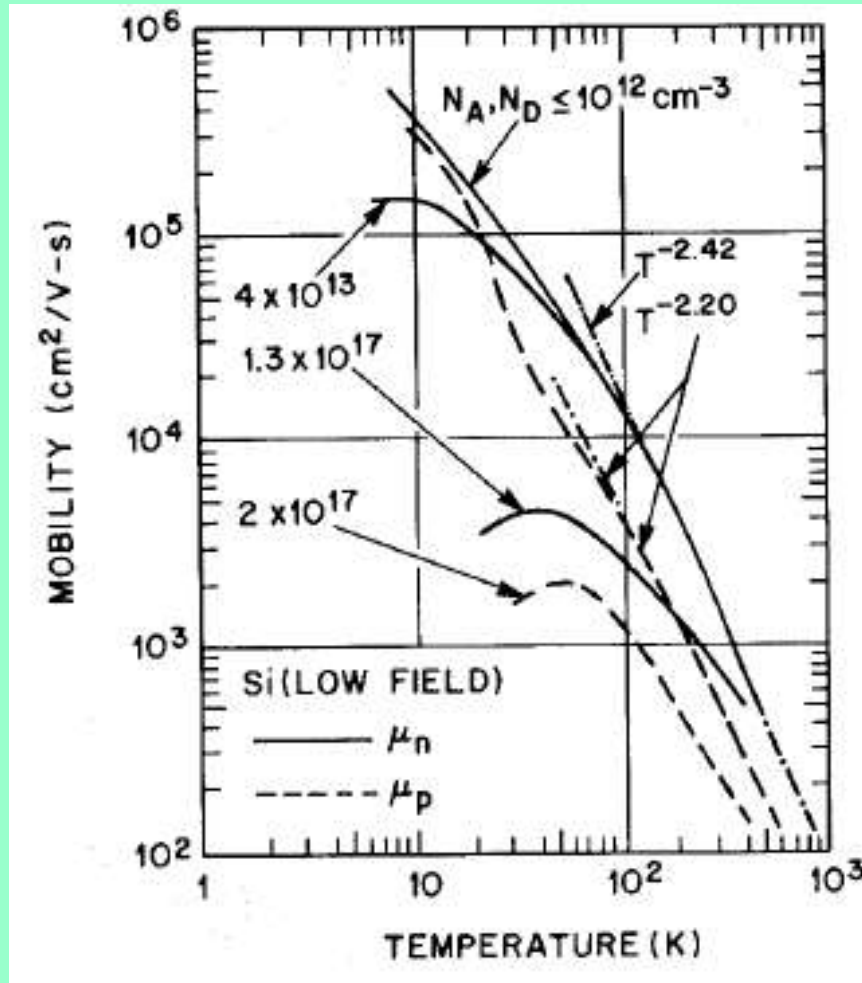
$$\mathcal{E}_c = 2 \times 10^4 \text{ V/cm} = 2 \text{ V}/\mu\text{m}$$

Velocità di saturazione



➤ questo fatto diventa importante con la progressiva diminuzione di dimensioni dei dispositivi !

Velocità di saturazione



- μ dipende anche da altri fattori come temperatura e drogaggio (scattering)

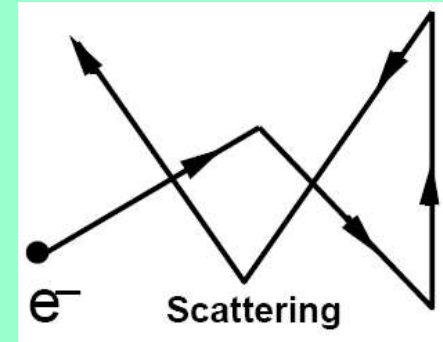
Trasporto dei portatori

➤ all'equilibrio termico gli elettroni in banda di conduzione (le lacune in banda di valenza) si muovono per agitazione termica

➤ energia termica = $\frac{3}{2}kT$ (k costante di Boltzmann)

$$\frac{1}{2}m_n v_{th}^2 = \frac{3}{2}kT \quad v_{th} = \text{velocità termica} \approx 10^7 \text{ cm/sec a } 300K$$

➤ in equilibrio termico il moto è casuale e la corrente totale è nulla



➤ gli eventi di diffusione (scattering) hanno diversa origine