

# Programma della I parte

---

- ◆ Cenni alla meccanica quantistica: il modello dell' atomo
- ◆ Dall' atomo ai cristalli: statistica di Fermi-Dirac, il modello a bande di energia, popolazione delle bande, livello di Fermi nei cristalli
- ◆ Classificazione dei materiali in base alla loro conducibilita' : metalli, semiconduttori, isolanti
- ◆ Semiconduttori intrinseci ed estrinseci; mobilita' , legge dell' azione di massa
- ◆ Trasporto nei semiconduttori: Drift, Diffusione, Legge di Einstein, Equazioni di continuita'

# Mobilita' dei Semiconduttori

Nei semiconduttori, si definisce un parametro di mobilita' che definisce la risposta dei portatori al campo elettrico. Percio' si definiscono due valori di mobilita', uno per gli elettroni e uno per le lacune.

In entrambi i casi, questa dipende dalla massa efficace del portatore e da un tempo caratteristico, che e' il tempo libero medio tra due collisioni successive.

$$\mu_{n,p} = \frac{e\tau_{n,p}}{m_{n,p}^*}$$

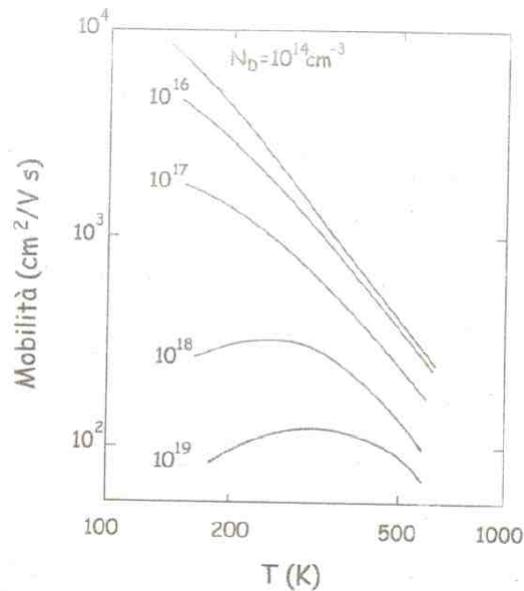
$$v = \mu E$$

Da cui:

$$\sigma = ne\mu_n + pe\mu_p$$

Poiche' la mobilita' dipende dagli urti, entra in gioco la dipendenza della loro frequenza dalla Temperatura.

# Mobilità dei Semiconduttori



Il portatore nel suo moto interno al cristallo subisce degli urti sia contro il reticolo che contro le impurità droganti. Queste collisioni limitano la velocità che il portatore può acquisire a causa del campo elettrico. A seconda del tipo di collisione, si definiscono due tempi caratteristici, uno riguardante gli urti con il reticolo e uno gli urti con le impurità.

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{\text{imp}}} + \frac{1}{\tau_{\text{vibr}}}$$

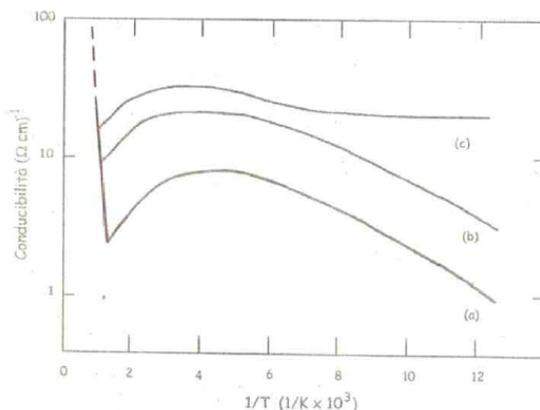
$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_{\text{imp}}} + \frac{1}{\mu_{\text{vibr}}}$$

A T ambiente, domina l'effetto delle vibrazioni reticolari (fononi)

$$\mu_{\text{vibr}} \propto T^{-\frac{3}{2}}$$

# Mobilita' dei Semiconduttori

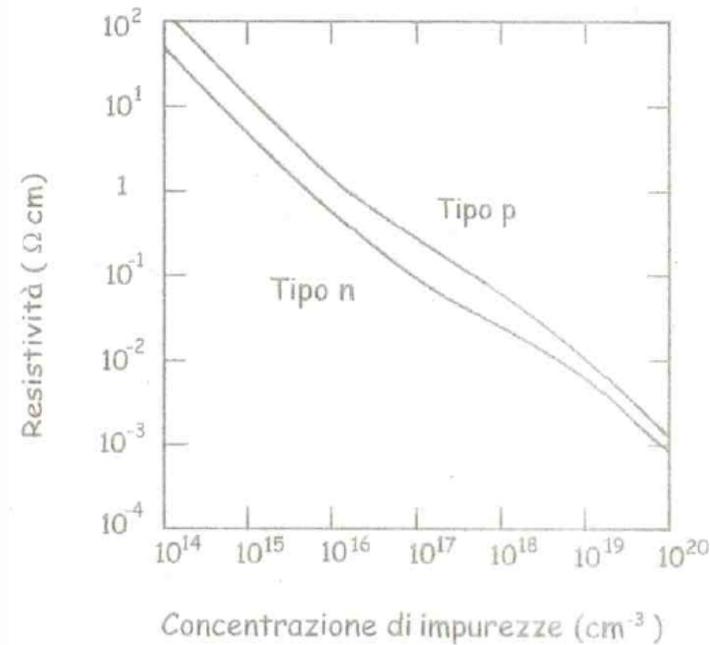
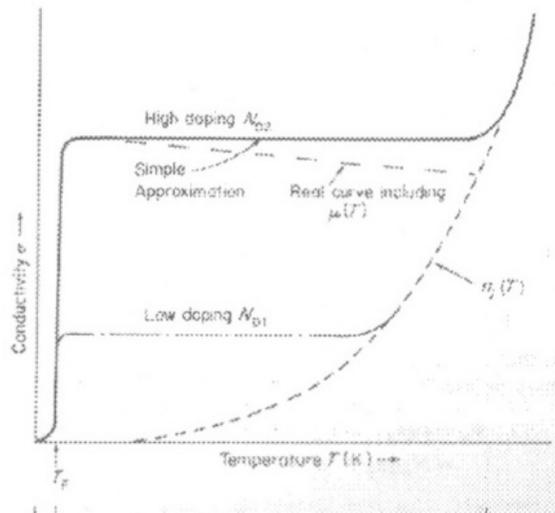
L'interazione con le impurezze dipende dal fatto che queste siano elettricamente neutre oppure cariche; solo in questo secondo caso infatti, l'interazione ha il potere di limitare significativamente la mobilita' dei portatori. D'altra parte lo stato di ionizzazione dei droganti dipende dalla temperatura. Percio' a temperature non troppo elevate, puo' accadere (dipende anche ovviamente dalla concentrazione dei droganti!) che domini questo effetto. E, fissata la temperatura, la mobilita' decresce all'aumentare della concentrazione dei droganti, perche' domina l'effetto dello scattering con i droganti.



Pero' al crescere della temperatura, la velocita' termica degli elettroni aumenta, e il tempo trascorso nelle vicinanze degli ioni droganti diminuisce, diminuendo cosi' la loro influenza sulla mobilita'. Per questo motivo, quando domina lo scattering da impurita', la mobilita' cresce al crescere della temperatura.

# Conducibilità dei Semiconduttori

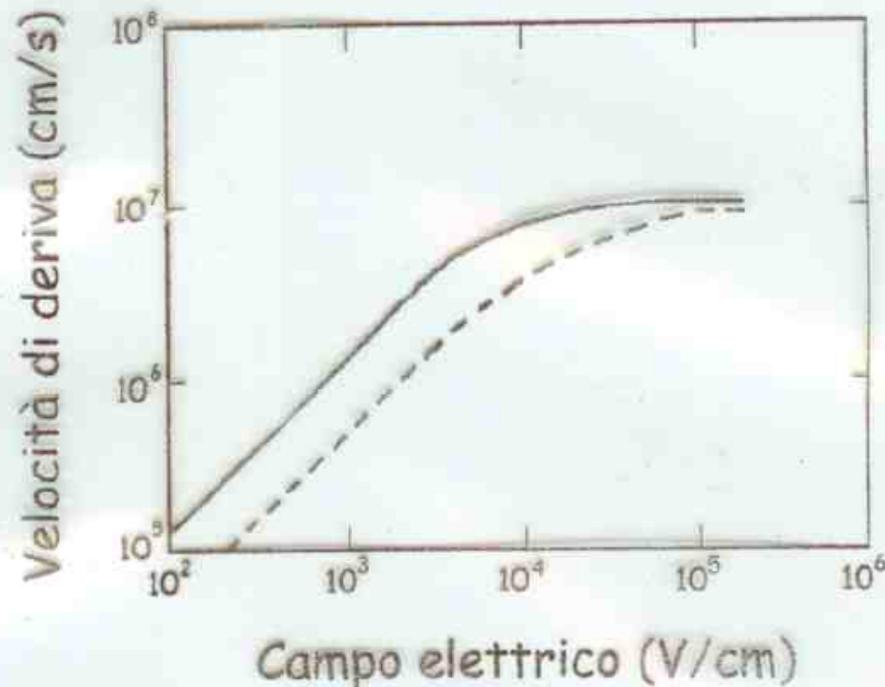
Come conseguenza della dipendenza dalla Temperatura di mobilità e della concentrazione dei portatori, anche la conducibilità dei semiconduttori dipende dalla temperatura.



# Effetto di campi elettrici elevati

Quanto detto finora si riferisce ad una situazione in cui l'intensità del campo elettrico applicato al sistema non è troppo elevata.

Si osserva invece che all'aumentare dell'intensità del campo elettrico, la velocità dei portatori tende dapprima a crescere e poi a saturare.



# Effetto di campi elettrici elevati

---

Questo effetto si spiega considerando che nella trattazione svolta finora si è supposto che i tempi liberi medi tra un urto e l'altro siano indipendenti dall'intensità del campo elettrico. Questo è vero finché la velocità dovuta al campo è piccola rispetto alla velocità termica posseduta dai portatori in assenza del campo (i due effetti si sovrappongono). È abbastanza ovvio che quando la velocità impressa dal campo aumenta, la frequenza degli urti dipende da quest'ultima (cioè aumenta). Quindi i portatori raggiungono una velocità limite che è per l'appunto la velocità di saturazione.

Un altro effetto dovuto agli alti campi è la moltiplicazione a valanga. In questo caso, se il campo è sufficientemente alto, i portatori, tra un urto e il successivo, possono acquisire a causa del campo, un'energia cinetica molto elevata, che durante l'urto viene trasferita al reticolo. Se questa energia è molto alta, si può produrre una ionizzazione di un atomo del reticolo con la conseguente creazione di una coppia elettrone-lacuna.

# Diffusione

---

Il campo Elettrico non e' l'unica causa possibile del moto dei portatori. Frequentemente, nei dispositivi elettronici, si producono dei gradienti nella concentrazione dei portatori, ovvero il profilo di concentrazione non e' costante ma varia lungo una certa direzione  $x$  (oppure in tutte le direzioni). Questo gradiente da origine ad un fenomeno fisico molto comune detto diffusione, che consiste nella produzione di una corrente di portatori che si muovono dalla zona in cui sono piu' concentrati alla zona in cui sono meno concentrati.

Si dimostra che la corrente corrispondente ad un moto di diffusione e' espressa dalla seguente relazione:

$$J_n = (-e)D_n \left(-\frac{dn}{dx}\right) = eD_n \frac{dn}{dx}$$
$$J_p = (+e)D_p \left(-\frac{dp}{dx}\right) = -eD_p \frac{dp}{dx}$$

Essendo  $D$  il coefficiente di diffusione del portatore. Tale grandezza dipende dalla massa efficace e dal tempo libero medio tra un urto e l'altro

# Relazione di Einstein

Si dimostra che c'è una relazione tra  $D$  e  $\mu$ , detta Relazione di Einstein:

$$\mathbf{D} = \frac{kT}{e} \mu$$

Perciò nel caso generale della compresenza di un campo elettrico e di un gradiente di concentrazione, la densità di corrente complessiva è data da:

$$\mathbf{J}_n = e\mu_n n\mathbf{E} + e\mathbf{D}_n \frac{dn}{dx}$$

$$\mathbf{J}_p = e\mu_p p\mathbf{E} - e\mathbf{D}_p \frac{dp}{dx}$$

$$\mathbf{J}_{\text{tot}} = \mathbf{J}_n + \mathbf{J}_p = e\mu_n n\mathbf{E} + e\mathbf{D}_n \frac{dn}{dx} + e\mu_p p\mathbf{E} - e\mathbf{D}_p \frac{dp}{dx}$$

# Semiconduttori fuori equilibrio

---

Consideriamo adesso il caso di semiconduttori in cui la concentrazione dei portatori sia variata dall'esterno, a causa di diversi tipi di meccanismi.

Ad esempio si possono iniettare nel semiconduttore dei portatori, connettendolo ad un generatore elettrico esterno, oppure illuminandolo con una luce opportuna. In tal caso, la legge di azione di massa non vale più e il sistema è "fuori equilibrio". Nei semiconduttori fuori equilibrio si instaurano dei meccanismi che tendono a riportare il sistema in equilibrio.

Come accennato, si possono introdurre dei portatori nel semiconduttore iniettandoli al suo interno mediante un contatto elettrico, oppure facendo assorbire al materiale dei fotoni la cui energia sia almeno superiore a quella del gap. In questo modo degli elettroni in banda di valenza possono acquisire l'energia necessaria per saltare in banda di conduzione. In questo modo si creano simultaneamente delle coppie elettrone-lacuna.

# Semiconduttori fuori equilibrio

E' anche possibile che la carica invece che essere generata sia eliminata attraverso dei processi di ricombinazione (passaggio di elettroni da BC a BV con la conseguente eliminazione di 1e e di 1 h). Fuori equilibrio, la concentrazione dei portatori e' regolata da un'equazione detta equazione di continuita' per i minoritari (i soli portatori la cui concentrazione e' cosi' bassa che queste variazioni siano significative). Vediamo come si ricava:

Si consideri una porzione lunga dx di semiconduttore di tipo n avente sezione costante A. Consideriamo l'ingresso di lacune in questa fetta di materiale: possiamo mettere in relazione l'eventuale variazione della concentrazione di portatori con la corrente. Percio', dati i valori della corrente in ingresso ( $I_p$ ) e in uscita ( $I_p+dI_p$ ), si avra' una variazione di lacune nel tempo data da:

$$\frac{dp_n}{dt} = -\frac{dI_p}{e} \frac{1}{A dx} = -\frac{1}{e} \frac{dJ_p}{dx} \quad \text{E analogamente:} \quad \frac{dn_p}{dt} = +\frac{dI_n}{e} \frac{1}{A dx} = +\frac{1}{e} \frac{dJ_n}{dx}$$

# Semiconduttori fuori equilibrio

Queste equazioni possono essere generalizzate, includendo tutti i possibili fenomeni di generazione e ricombinazione di carica.

$$\frac{dp_n}{dt} = G_p - U_p - \frac{1}{e} \frac{dJ_p}{dx}$$

$$\frac{dn_p}{dt} = G_n - U_n + \frac{1}{e} \frac{dJ_n}{dx}$$

$G_p$  e  $G_n$  rappresentano i tassi di generazione dei portatori, ovvero il numero di portatori prodotti nell'unità di tempo e nell'unità di volume.

$U_n$  e  $U_p$  rappresentano i tassi di ricombinazione di elettroni e lacune.

Si dimostra che essi sono esprimibili come:

$$U_p = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$$

$$U_n = \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}$$

Con i tempi pari al tempo di vita medio di un minoritario. Se ora sostituiamo l'espressione di  $J$ , le equazioni diventano:

$$\frac{dp_n}{dt} = G_p - U_p - \frac{1}{e} \frac{d}{dx} \left( \mu_p e p_n E - e D_p \frac{dp_n}{dx} \right)$$

$$\frac{dn_p}{dt} = G_n - U_n + \frac{1}{e} \frac{d}{dx} \left( \mu_n e n_p E + e D_n \frac{dn_p}{dx} \right)$$

# Semiconduttori fuori equilibrio

Sviluppando i conti si ottiene:

$$\frac{dp_n}{dt} = G_p - U_p - \mu_p p_n \frac{dE}{dx} - \mu_p E \frac{dp_n}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2}$$

$$\frac{dn_p}{dt} = G_n - U_n + \mu_n n_p \frac{dE}{dx} + \mu_n E \frac{dn_p}{dx} + D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2}$$

$$\frac{dp_n}{dt} = G_p - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} - \mu_p p_n \frac{dE}{dx} - \mu_p E \frac{dp_n}{dx} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2}$$

$$\frac{dn_p}{dt} = G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n} + \mu_n n_p \frac{dE}{dx} + \mu_n E \frac{dn_p}{dx} + D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2}$$

Le equazioni di continuita' rappresentano un bilancio delle popolazioni di elettroni e lacune: la variazione nel tempo della loro concentrazione e' pari al tasso netto di ricombinazione (ovvero bilancio di generazione e ricombinazione), piu' la variazione di carica causata dal flusso di portatori che costituisce la densita' di corrente.