
S.I.C.S.I.

Scuola Interuniversitaria Campana di
Specializzazione all'Insegnamento
VIII ciclo - a.a. 2008/2009

Conduzione elettrica nei metalli

(conduttori e semiconduttori)

Corso di Laboratorio di Didattica della Fisica III

Arturo Stabile

Baronissi

9 Dicembre 2008

Che cos'è un solido?

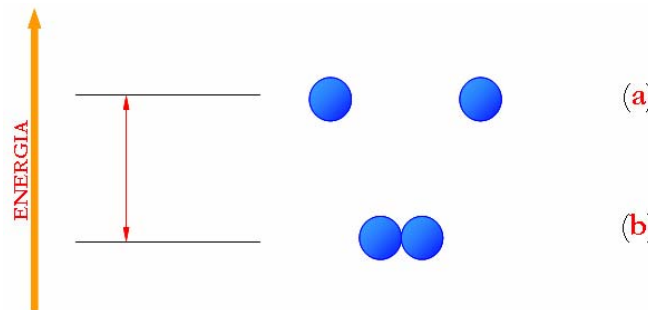
Quando due atomi vengono avvicinati tra loro, si genera una forza che causa una distorsione delle loro nubi elettroniche ed un cambiamento dei livelli energetici. Durante la formazione dei legami chimici, gli atomi raggiungono una situazione di maggiore stabilità. L'energia totale del sistema costituito dai due atomi legati insieme è minore dell'energia totale del sistema costituito dai due atomi separati.

Elettronegatività è una grandezza che misura “la forza” con cui ogni atomo tiene legati a sé i suoi elettroni.

Il legame covalente (o omopolare) consiste in una distribuzione uniforme della carica elettronica nello spazio compreso tra i due atomi.

Un legame ionico si forma fra atomi che hanno una forte differenza di elettronegatività.

I **metalli** hanno bassa energia di ionizzazione (quantità di energia necessaria per strappare un elettrone a un atomo neutro) e di elettronegatività. Quindi i loro elettroni esterni sono attratti debolmente dai rispettivi nuclei, e se ne separano facilmente.

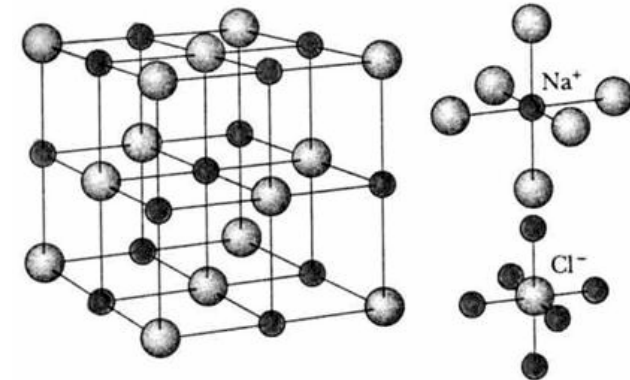
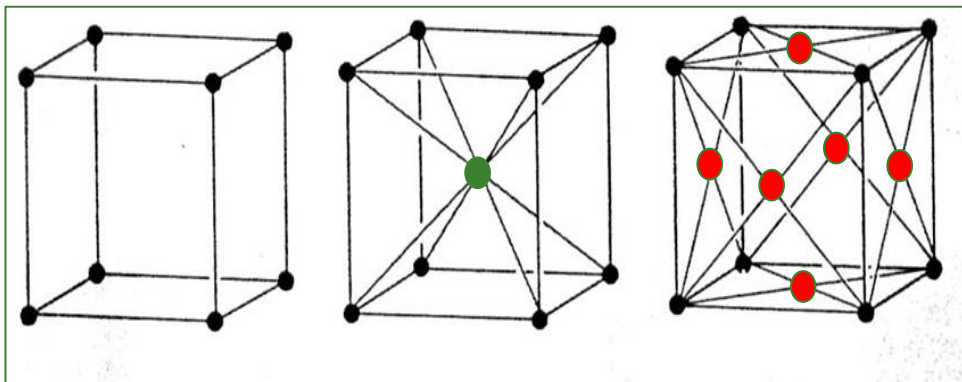


Disposizione degli atomi

Un solido è costituito da atomi o molecole legati tra di loro in modo rigido.

Circa i quattro quinti di tutti gli elementi sono metalli, che sono tutti solidi tranne il mercurio.

La libertà di movimento degli elettroni è all'origine delle proprietà dei metalli: conducibilità elettrica, conducibilità termica, malleabilità e duttilità.

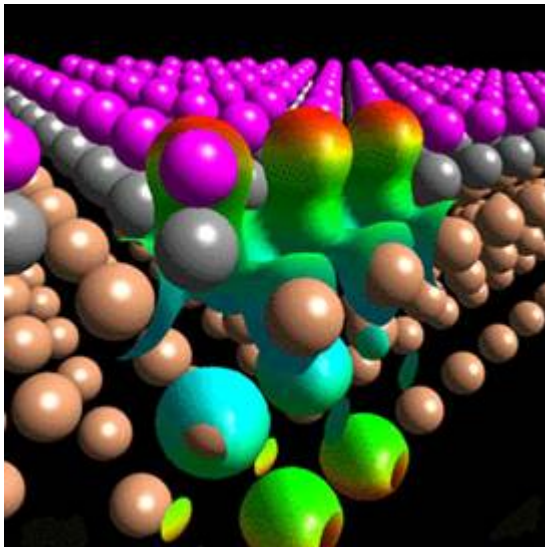


Conducibilità e resistività dei metalli

Metalli: gli elettroni sono liberi di muoversi. La conducibilità diminuisce con la temperatura.

Semiconduttori: allo zero assoluto non c'è conducibilità elettrica e la conducibilità cresce con la temperatura.

Isolanti: Conducibilità zero in un ampio intervallo di temperature.

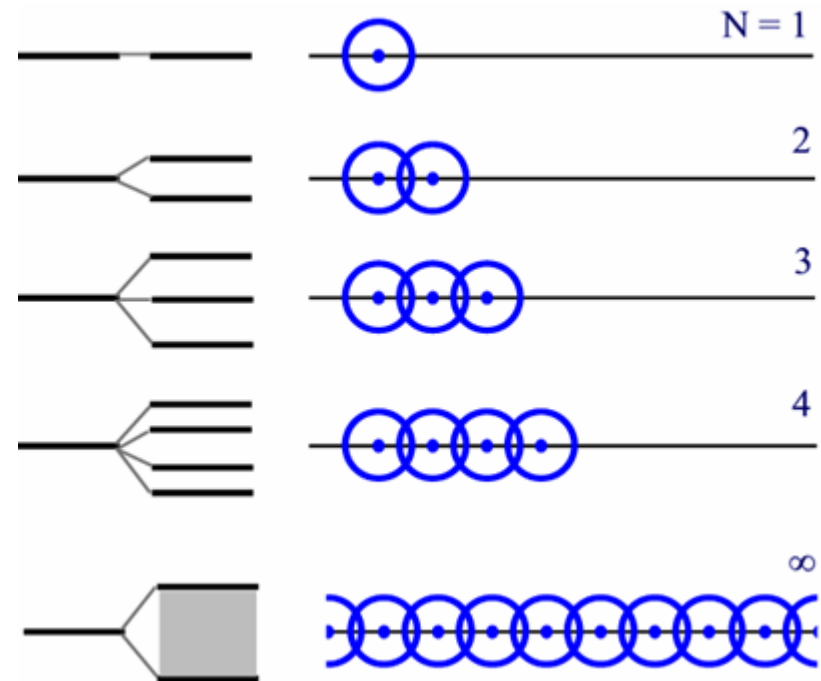


Resistività ($\Omega \cdot \text{cm}$)	Materiale
$\rho < 10^{-3}$	Metalli
$10^{-3} < \rho < 10^5$	Semiconduttori
$\rho > 10^5$	Isolanti

Formazione delle bande energetiche nei solidi

Consideriamo un solido fatto con una sostanza che abbia un solo orbitale s . Quando il numero di atomi che hanno orbitali che si sovrappongono cresce diminuisce la distanza tra i livelli energetici degli orbitali. Nel caso di N atomi (con N molto grande) i livelli energetici sono così vicini che appaiono come un continuo.

Le diverse proprietà elettriche derivano dal diverso riempimento delle bande di energia nei solidi.



Corrente elettrica

La corrente elettrica è un flusso “ordinato” di elettroni. La corrente elettrica è un qualsiasi flusso di carica elettrica, tipicamente attraverso un filo metallico o qualche altro materiale conduttori.

La corrente convenzionale venne definita inizialmente, nella storia dell'elettricità, come il flusso di carica positiva, anche se sappiamo, nel caso della conduzione metallica, che la corrente è causata dal flusso di elettroni con carica negativa nella direzione opposta.

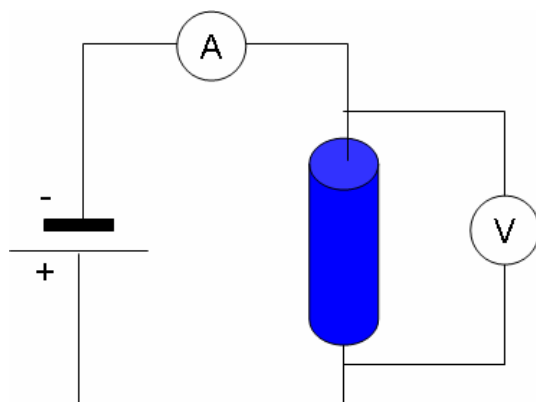
Nei metalli gli atomi sono talmente vicini che qualche elettrone esterno viene a trovarsi nel campo elettrico dell'atomo più vicino. Per questo motivo qualche elettrone esterno per atomo diventa libero di muoversi da un atomo all'altro.

Tutti gli esperimenti di elettrostatica sui metalli si interpretano con il movimento degli elettroni liberi (elettroni di conduzione).

Leggi di Ohm



Sperimentalmente è possibile ricavare una legge che lega la d.d.p. ai capi di un filo conduttore con la corrente che lo attraversa



corrente $i = \frac{dq}{dt}$ (Amps)

$$q = \int i dt$$

$$i = \frac{V}{R}$$

Prima legge di Ohm, R = resistenza elettrica

$$R = \frac{\rho L}{A}$$

Seconda legge di Ohm, ρ resistività

$$\sigma = 1/\rho$$

σ conducibilità

Per i metalli si trova che ρ aumenta con la temperatura secondo una legge lineare:

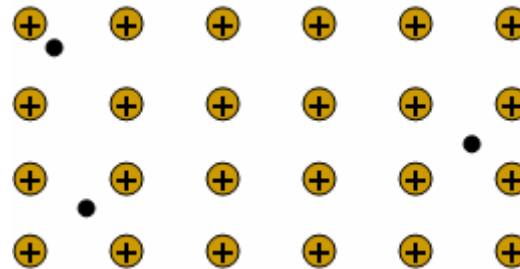
$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

Modello di Drude I



Ipotesi fondanti del modello:

1. Elettroni liberi di muoversi;
2. I nuclei sono responsabili solo della struttura del solido e tali da rendere mediamente nulla la carica elettrica nella materia;
3. Gli elettroni urtano mediamente ogni dato intervallo di tempo contro i nuclei;

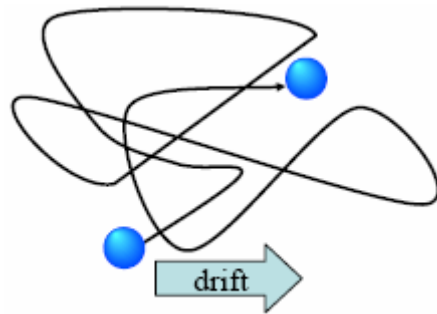


4. Applicando un campo elettrico esterno gli elettroni iniziano ...
5. Il trasporto della corrente avviene mediante “portatori di carica”. Questi, nei conduttori, sono elettroni “liberi”.

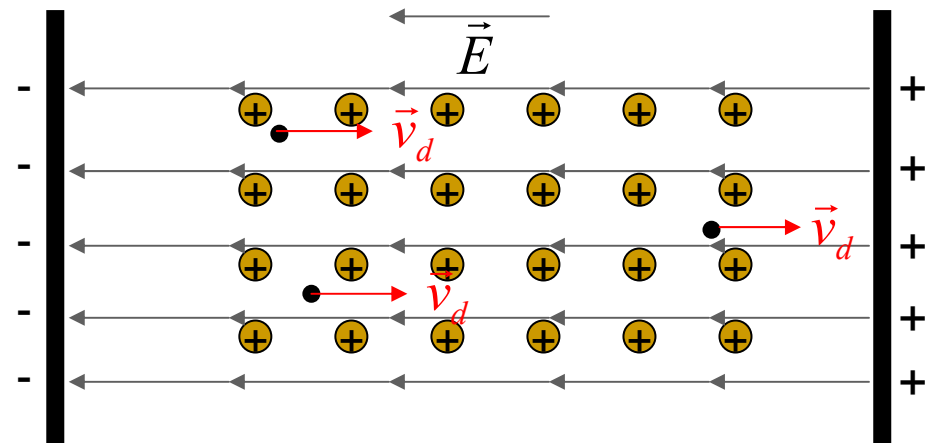
Modello di Drude II



Gli elettroni si muovono in modo casuale su piccole distanze e ad alta velocità (circa 10^6 m/s).



Se agli estremi di un conduttore si applica dall'esterno una d.d.p. allora il campo elettrico (all'interno del materiale) non è più nullo e su ciascun elettrone agirà una forza. La velocità di drift è dell'ordine di 10^4 m/s.

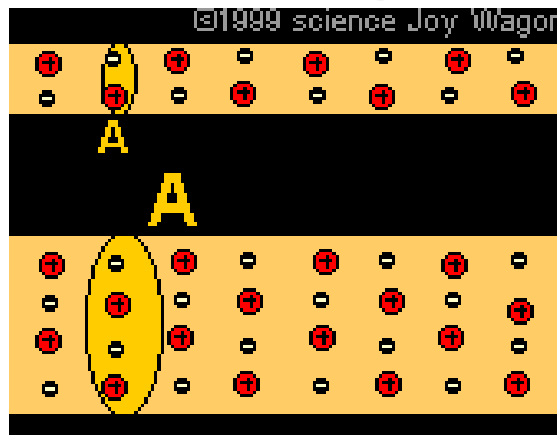
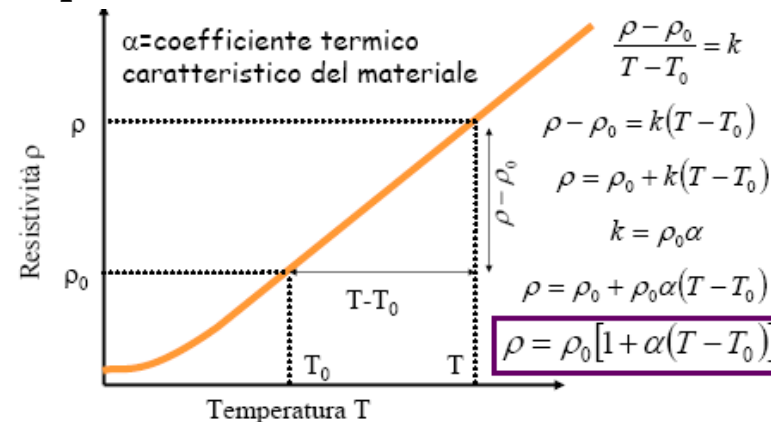
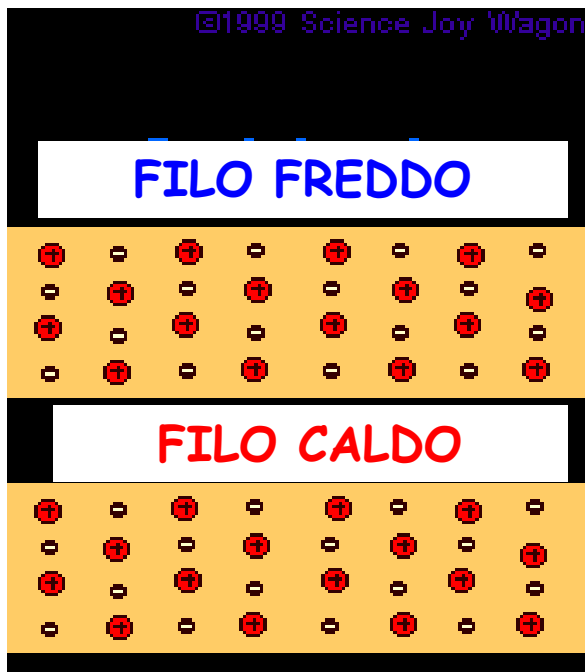


Modello di Drude III



Resistenza dei metalli dipende fortemente dalla temperatura.

Una **visione pittorica** del fenomeno può essere:



In realtà: l'urto non è contro gli ioni del reticolo ...

La conduzione è possibile perché esiste l'impurità!!!

Reticolo non è periodico al 100 %

Modello di Drupi

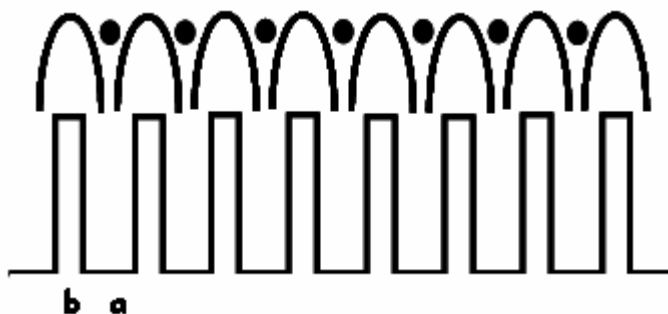


Elettrone in un potenziale periodico

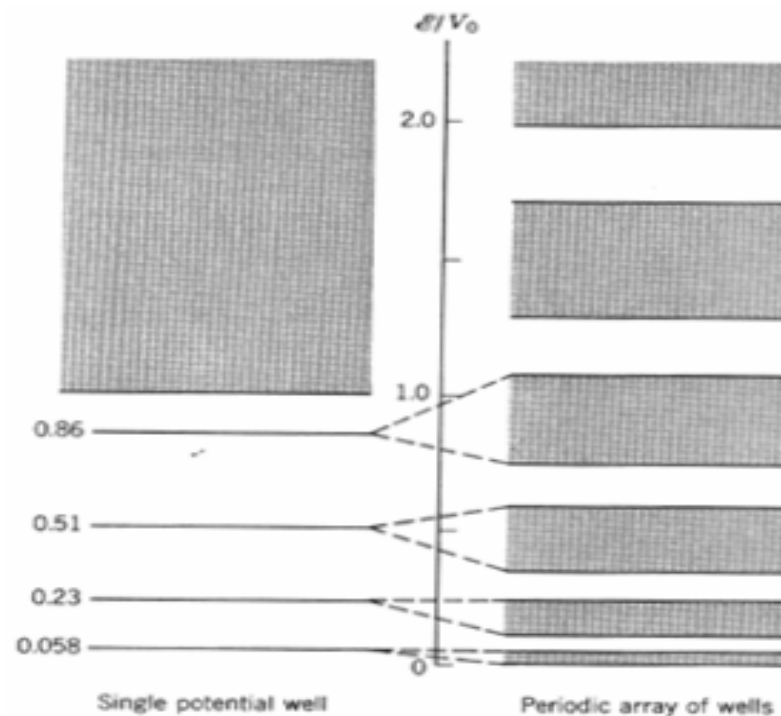
Il modello ad elettroni liberi è molto semplice e funziona molto bene solo per i metalli alcalini.

Modello più complesso che tiene conto della interazione degli elettroni con gli ioni.

Gli elettroni si muovono in una successione regolare di buche di potenziale (modello di Kronig e Penney)

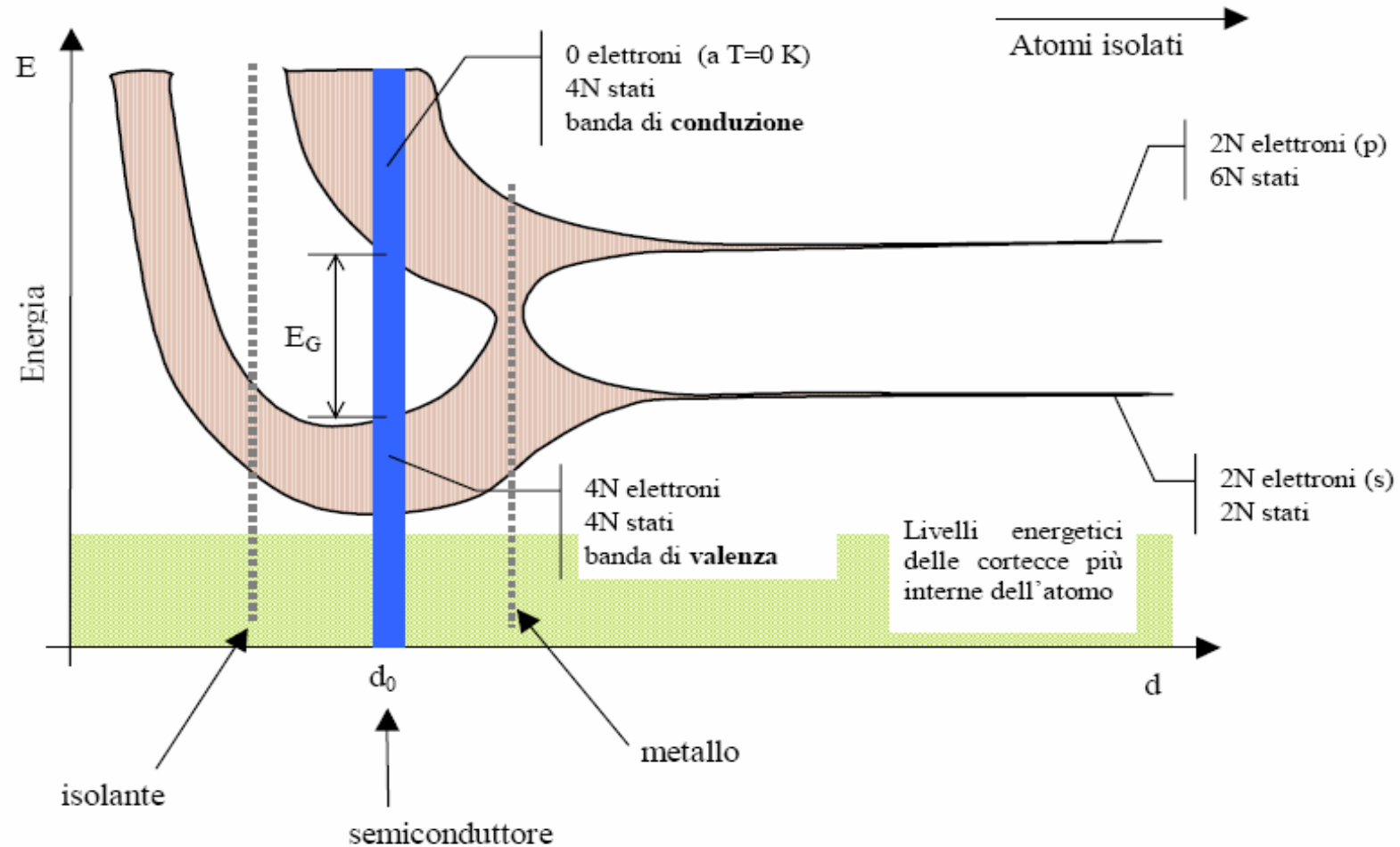


Gli elettroni ben dentro la buca non risentono della periodicità del potenziale e non possono neanche “tunnellare” tra una buca e l'altra.



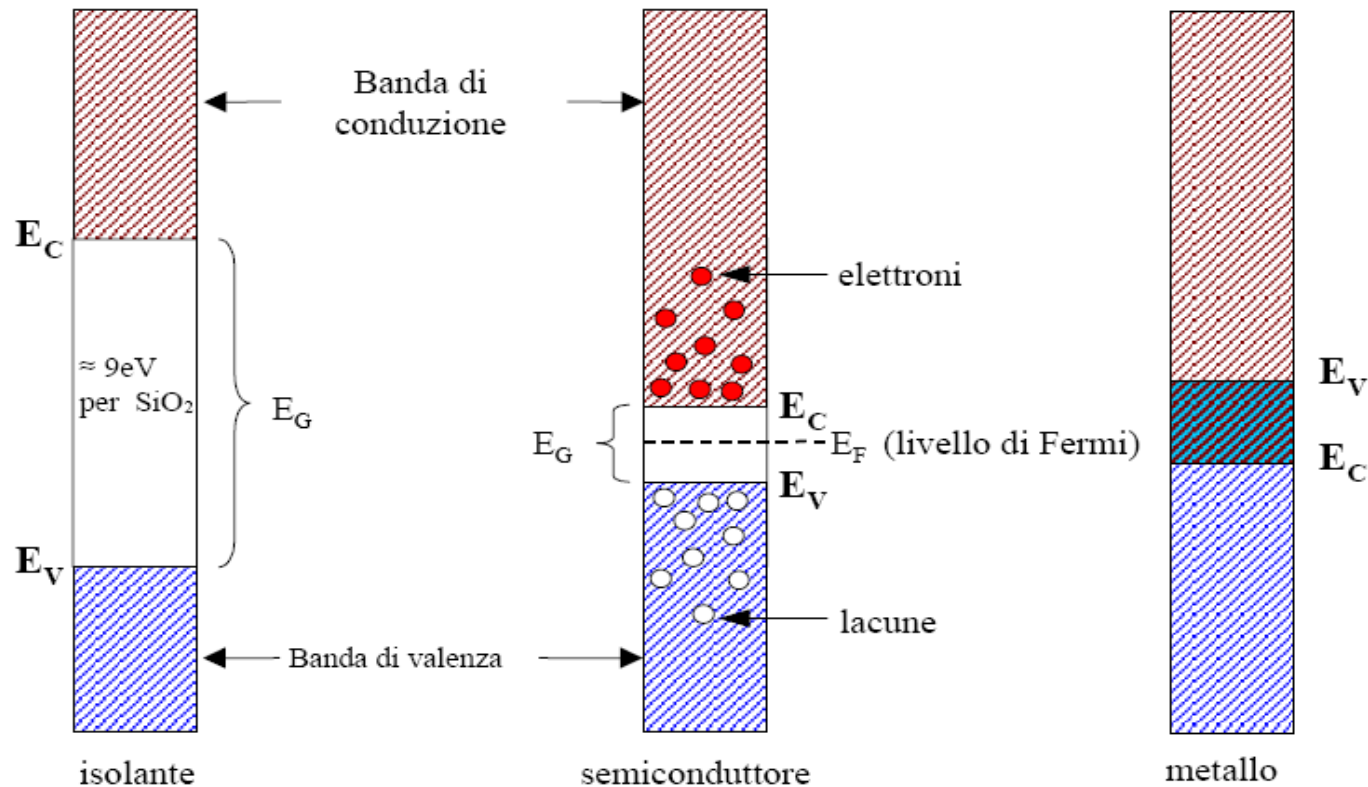
Modello a bande per metalli I

Configurazione degli stati di energia in funzione della spaziatura interatomica.



Modello a bande per metalli II

Ogni materiale può essere classificato in una delle 3 categorie seguenti sulla base della disposizione dei livelli E_C , E_V .



Modello a bande per metalli III

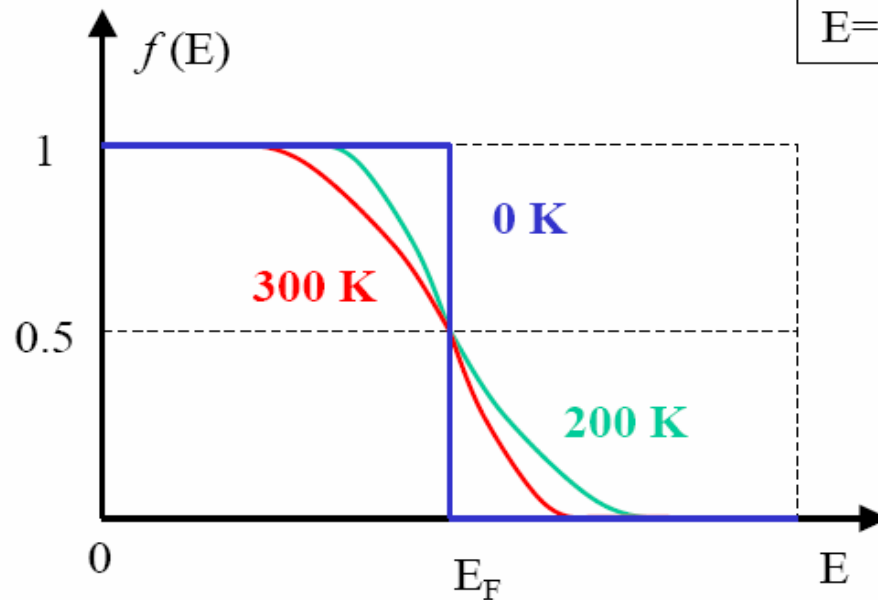
La funzione di distribuzione di Fermi - Dirac $f(E)$ indica la probabilità che un elettrone occupi un certo stato elettronico avente energia E .

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{(E-E_F)}{k \cdot T}}}$$

k =costante di Boltzmann [eV/K]

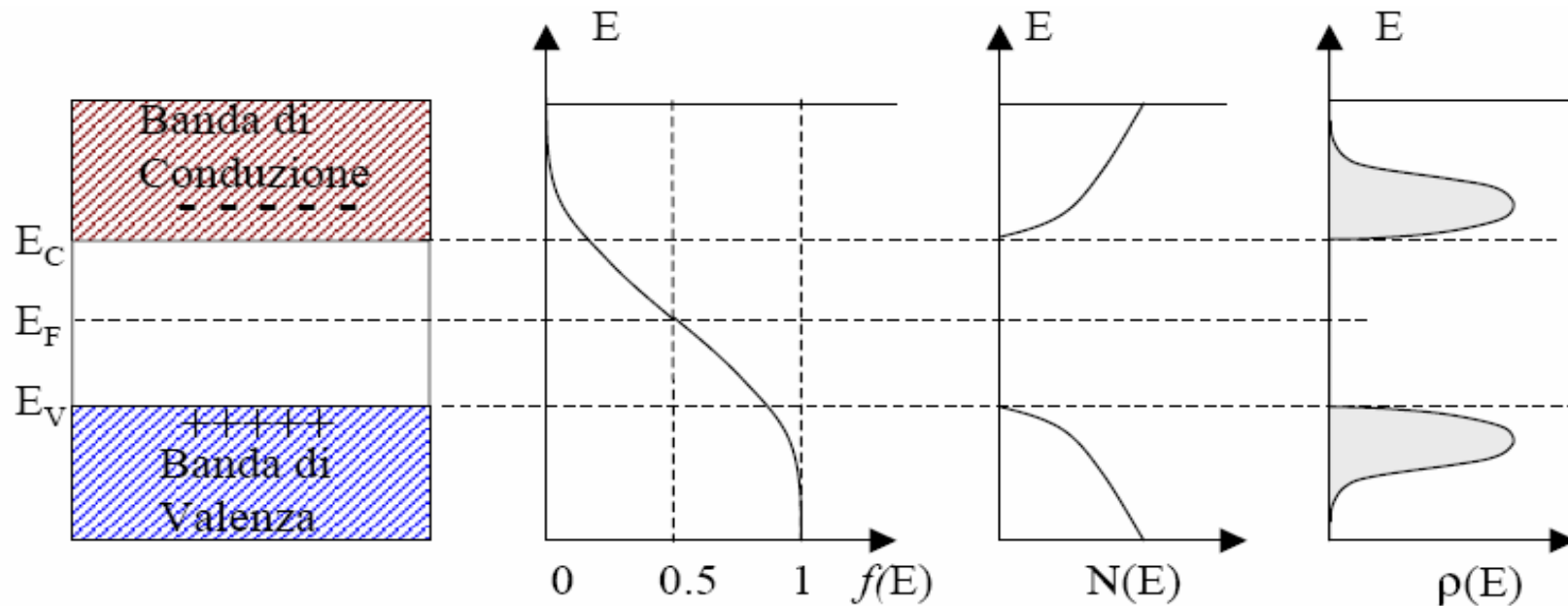
T =temperatura assoluta in [K]

E =livello di Fermi [eV]



Modello a bande per metalli IV

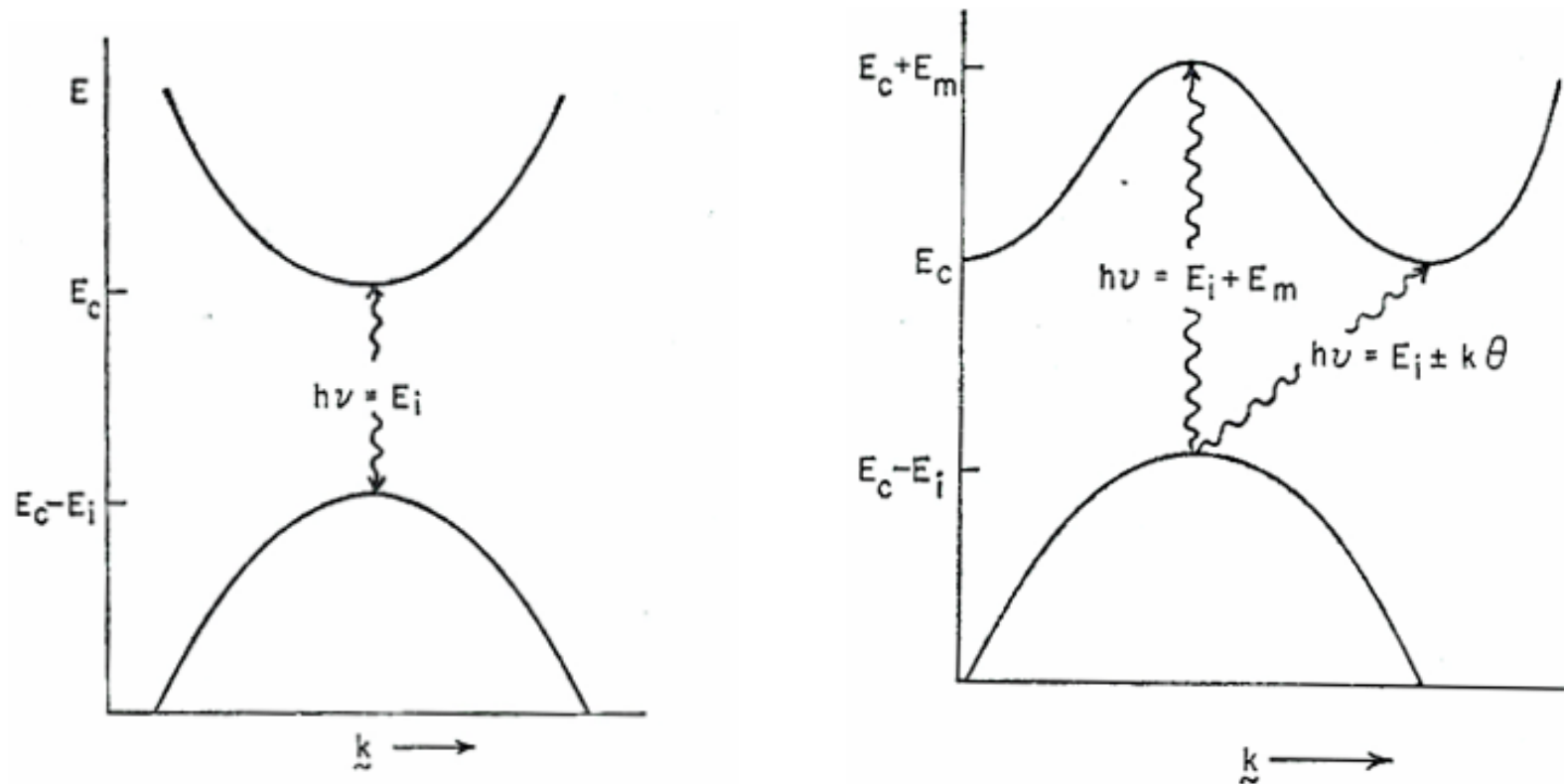
Maggiore temperatura maggiore probabilità di salto per gli elettroni.



$$n_C = \int_{E=E_C}^{\infty} f(E) \cdot N(E) dE \quad ; \quad n_V = \int_{E=0}^{E_V} f(E) \cdot N(E) dE \quad ;$$

Modello a bande per metalli V

Transizione **diretta** ed **indiretta**: Conferire quantità di moto all'elettrone.

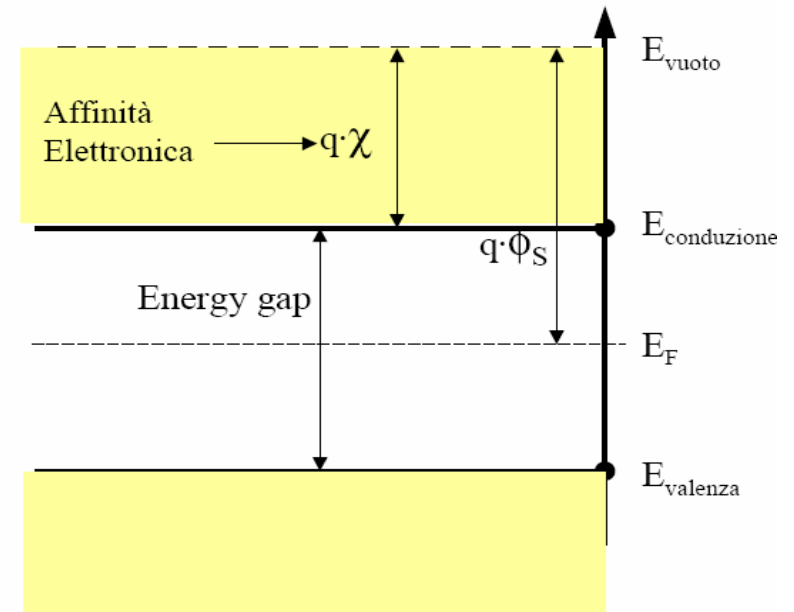
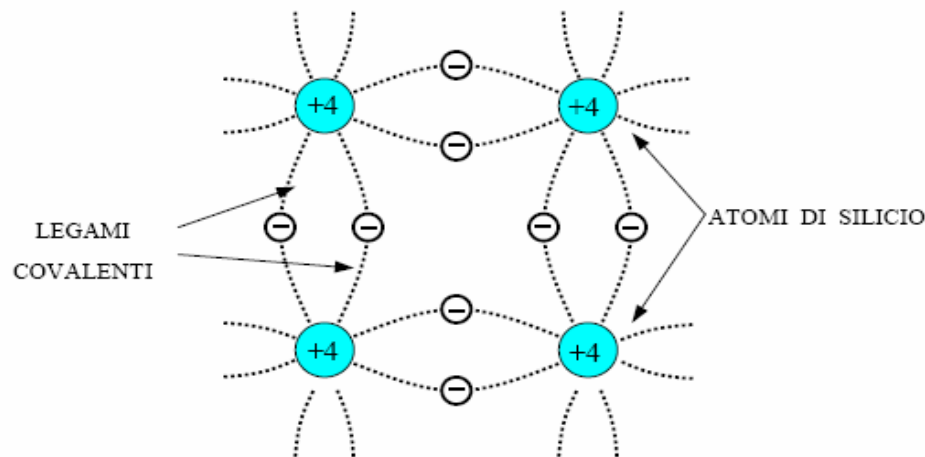


Semiconduttore intrinseco I

Nei conduttori, già a temperatura ambiente gli elettroni sono liberi di muoversi.

Nei semiconduttori, invece, la temperatura ambiente non è sufficiente a permettere loro di rompere i legami (covalenti) che li legano al reticolo cristallino. Solo pochi elettroni riescono a staccarsi dal reticolo, lasciando un posto vuoto che può essere occupato da un altro elettrone.

In queste condizioni, i semiconduttori si dicono intrinseci.

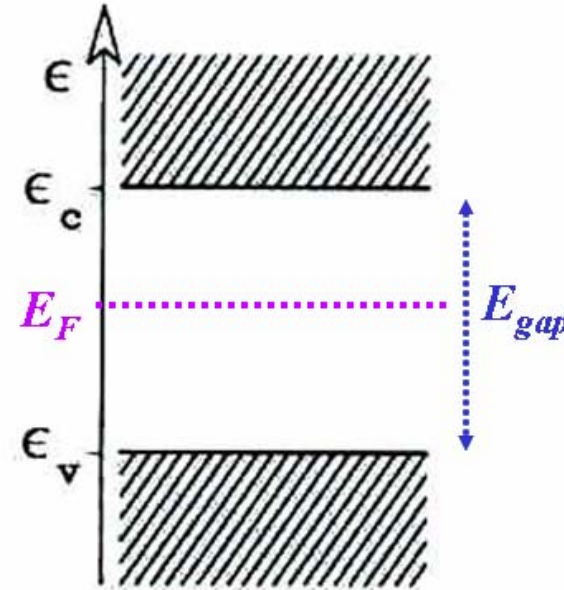


Semiconduttore intrinseco II

Calcolo del livello di Fermi.

$$n = 2 \left(\frac{m^* k_B T}{2 \pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-E_{gap} / 2 k_B T}$$

$$n = 2 \left(\frac{m_e k_B T}{2 \pi \hbar^2} \right)^{3/2} e^{-(E_c - E_F) / k_B T}$$

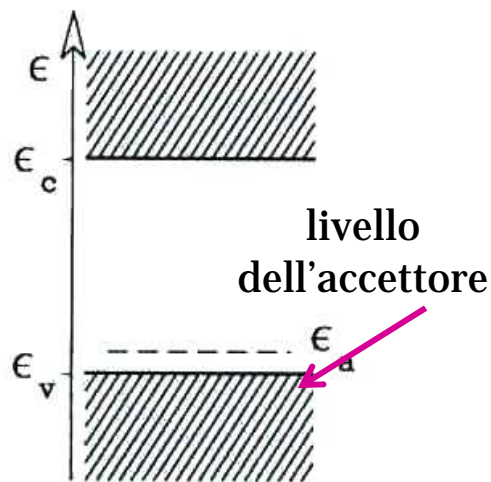
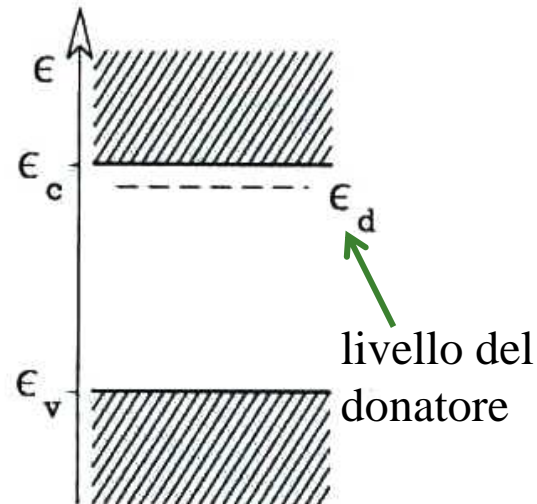


Stima dei portatori di carica a temperatura ambiente (in un metallo siamo a 10^{29} m^{-3} .)

$$n_i = 2 \left(\frac{m^* c^2 k_B T}{2 \pi (\hbar c)^2} \right)^{3/2} e^{-E_{gap} / 2 k_B T} \approx 2 \left(\frac{0,2 \cdot 0,5 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 10^{-2} (eV)^2}{6 \cdot (2 \cdot 10^{-7} eVm)^2} \right)^{3/2} e^{-1,1 / 2 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}$$

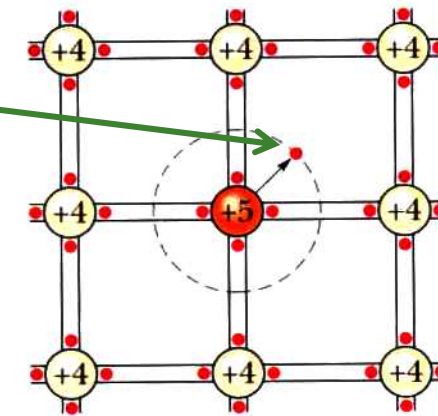
$$\approx \left(10^{16} \text{ m}^{-2} \right)^{3/2} e^{-18} \approx 10^{16} \text{ m}^{-3}$$

Semiconduttore estrinseco I



donatore

drogaggio tipo "n" con un atomo pentavalente (fosforo): il donatore introduce un livello energetico E_d molto popolato poco sotto il fondo della banda di conduzione E_c



acceptore

