

# MA0748 - FISICA PER I DISPOSITIVI IOT

Lorenzo Santi

*AA 2022/23 – Lezione 11 12/04/2023*

# Argomenti della lezione di oggi

- Semiconduttori
  - Semiconduttori intrinseci
  - Semiconduttori drogati (estrinseci)

Ricapitoliamo dei concetti che abbiamo visto nella lezione 3.

Un materiale solido cristallino è formato da atomi disposti in una struttura reticolare. Gli elettroni di questi atomi, a causa del principio di esclusione di Pauli, devono avere stati tutti diversi tra di loro.

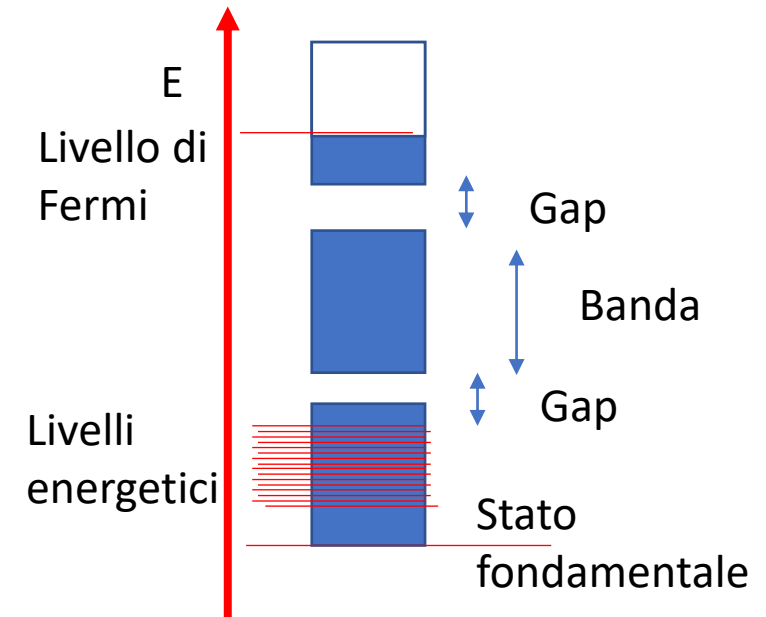
In un modello semplificato in cui due elettroni non possono avere lo stesso stato in energia, gli elettroni hanno quindi energie tutte diverse fra di loro.

In un materiale cristallino però queste energie non possono avere un valore qualsiasi, ma solo ben determinati valori, i **livelli energetici** elettronici della struttura.

I livelli energetici hanno un livello minimo in energia, chiamato **stato fondamentale**, e poi sono distribuiti discretamente per valori di energia crescenti (la distribuzione discreta significa che in un certo intervallo di valori di energia, sono definiti un numero molto grande ma finito di livelli).

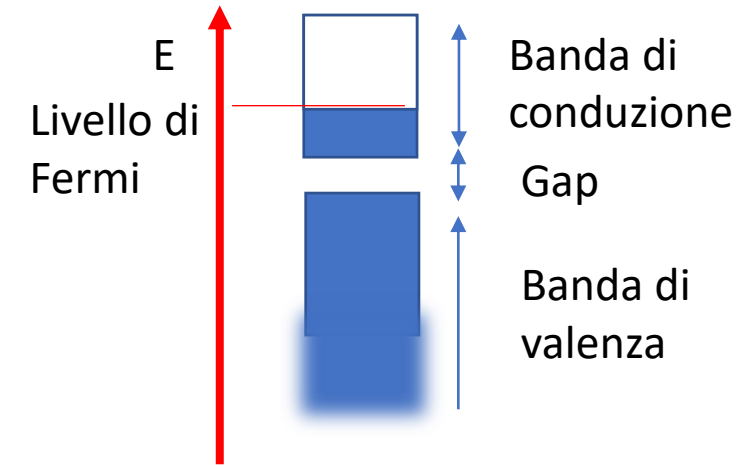
Vi sono delle eccezioni nella distribuzione estremamente densa dei livelli energetici: ci sono degli intervalli di energia estesi (chiamati **gap**) nei quali non sono permessi dei livelli energetici.

Questi gap formano delle strutture nella distribuzione dei livelli, chiamate **bande**, nelle quali i livelli sono distribuiti fittamente, separate da intervalli di energia proibita.



Gli elettroni **di norma** si distribuiscono in modo da ridurre l'energia complessiva del sistema e quindi riempiono i livelli fino ad un **valore massimo di energia**, associato a quello del cosiddetto **livello di Fermi**. Il livello di Fermi è definito dal numero complessivo degli elettroni del materiale, che devono riempire tutti i livelli ad energia inferiore.

Trascurando le bande ad energie più basse, le bande rilevanti per il fenomeno di conduzione di corrente sono due

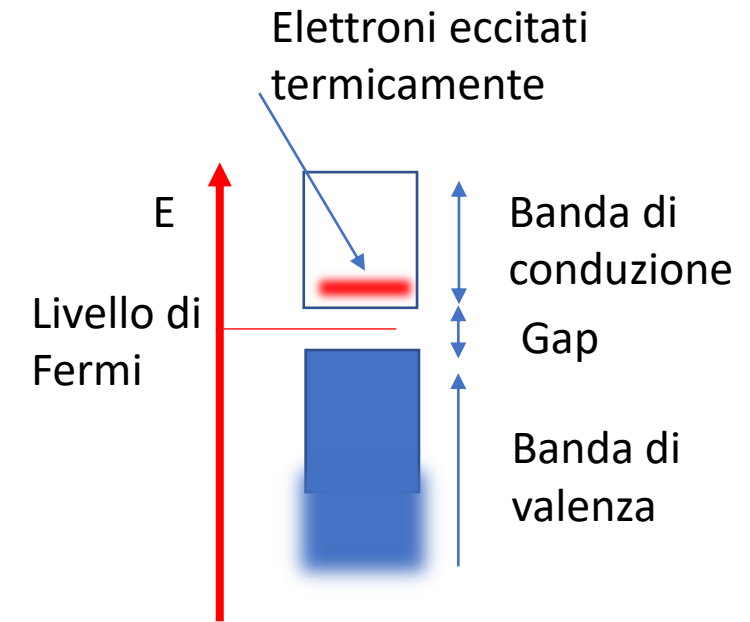


- La banda di energia più bassa almeno parzialmente non occupata da elettroni, chiamata **banda di conduzione**. Eventuali elettroni su livelli in questa banda contribuiscono alla conduzione elettrica.
- La banda immediatamente sottostante, chiamata **banda di valenza**. Elettroni su livelli in questa banda realizzano legami covalenti tra atomi vicini e contribuiscono a rendere rigida la struttura reticolare. Di norma non possono allontanarsi dagli atomi a cui sono legati e quindi non contribuiscono alla conduzione.

Le diverse proprietà elettriche dei materiali sono legate al fatto se il livello di Fermi cade nella banda di conduzione (e quindi ci sono elettroni disponibili per la conduzione) oppure no (e il livello di Fermi è tra le due bande, come in figura).

Nel primo caso si parlerà di **conduttori**, nel secondo di isolanti o semiconduttori.

**La differenza tra isolanti e semiconduttori è legata all'entità del gap** in energia tra le bande di conduzione e di valenza.



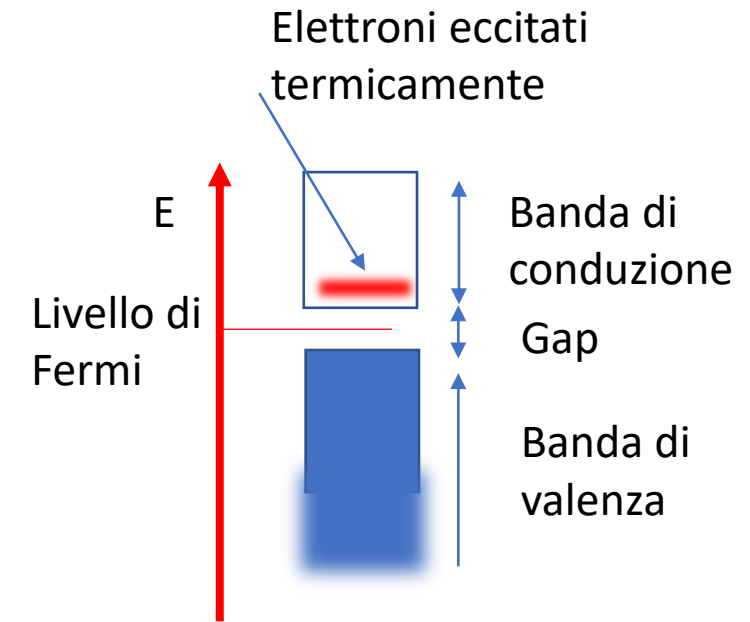
Se tutti gli elettroni fossero effettivamente confinati nella banda di valenza, non ve ne sarebbero di disponibili per la conduzione: a temperature superiori allo zero assoluto però una frazione degli elettroni viene eccitata termicamente e passa nella banda di conduzione.

La frazione di elettroni eccitata aumenta con l'aumentare della temperatura ma soprattutto è molto maggiore per piccoli valori del gap. Poiché la conduzione dipende dal numero di portatori di carica liberi di muoversi in quest'ultimo caso (quello dei **semiconduttori**) la resistività elettrica del materiale è di diversi ordini di grandezza inferiore a quella degli isolanti.

# Semiconduttori

## Semiconduttori intrinseci

I **semiconduttori intrinseci** sono **materiali puri** con un livello di Fermi che esclude la banda di conduzione, ma con un gap di energia tra le bande di conduzione e di valenza dell'ordine di 1 eV, rispetto agli isolanti veri propri, che hanno gap di diversi eV.



Per due materiali semiconduttori quali il silicio ed il germanio, molto usati nelle componenti elettroniche si ha rispettivamente

Germanio      $0.7 \text{ eV}$

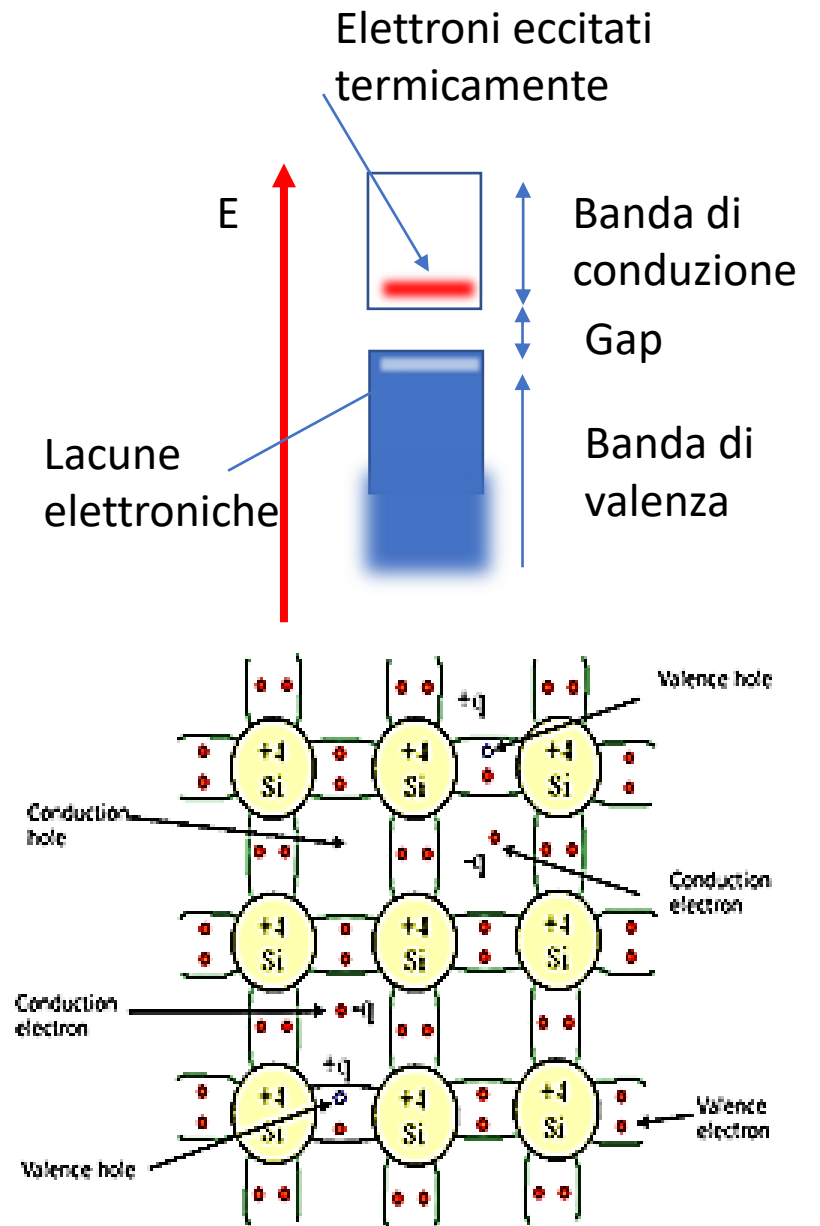
Silicio         $1.2 \text{ eV}$

L'eccitazione termica di elettroni nella banda di conduzione lascia nella banda di valenza dei livelli energetici liberi (**lacune**), disponibili per l'eventuale moto degli elettroni.

Il moto degli elettroni di valenza che vanno in una lacuna contribuisce alla conduzione elettrica nel materiale: per tale motivo in un semiconduttore intrinseco (ed in un isolante in generale) sono importanti due contributi alla corrente elettrica

- Quello del moto degli elettroni nella banda di conduzione, dipendente dalla loro **densità volumetrica  $n$**  (numero di portatori di carica per volume unitario)
- Quello del moto degli elettroni nella banda di valenza, dipendente dalla **densità volumetrica  $p$**  dei livelli lasciati liberi da elettroni passati in banda di conduzione (**lacune**)

(in figura **hole** è il termine inglese per lacuna)

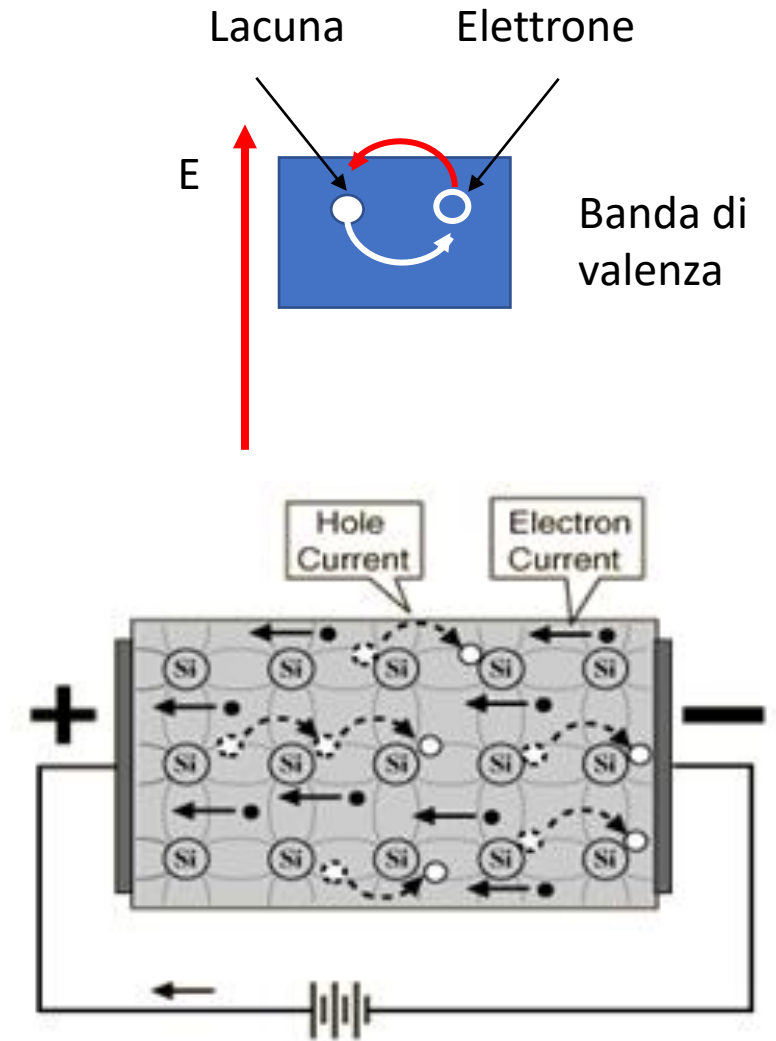


Il moto degli elettroni di valenza verso una lacuna risulta però avvenire con caratteristiche diverse da quelle degli elettroni di conduzione.

Viene preferito descrivere il contributo alla conduzione dovuto a questo fenomeno mediante una **quasi particella**, la lacuna, che si muove in direzione opposta.

Questa quasi particella ha tutte le caratteristiche di un **portatore di carica positiva**  $+e$  e la densità volumetrica  $n_h$  viene reinterpretata come densità di portatori positivi.

Per un semiconduttore intrinseco (ed un isolante in generale) risulta  $n = p = n_i$  (ove  $n_i$  sta per densità del semiconduttore intrinseco) e le correnti negative dovute al moto di elettroni e quelle positive dovute al moto delle lacune hanno un ruolo quasi paritetico nella conduzione elettrica nel materiale.





Il numero di portatori di carica  $n_i$  dipende dalla temperatura: secondo un semplice modello, risulta

$$n_i \propto T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\Delta E}{\frac{1}{2}kT}\right)$$

ove  $T$  è la temperatura in gradi Kelvin,  $\Delta E$  il gap in energia tra la banda di conduzione e quella di valenza e  $k$  una costante opportuna (chiamata costante di Boltzman).

La scala di temperatura in gradi Kelvin è simile a quella centigrada, solo che il suo zero (zero assoluto) è tale che temperature ordinarie (dell'ordine di 27°C) ha un valore di circa 300 K.

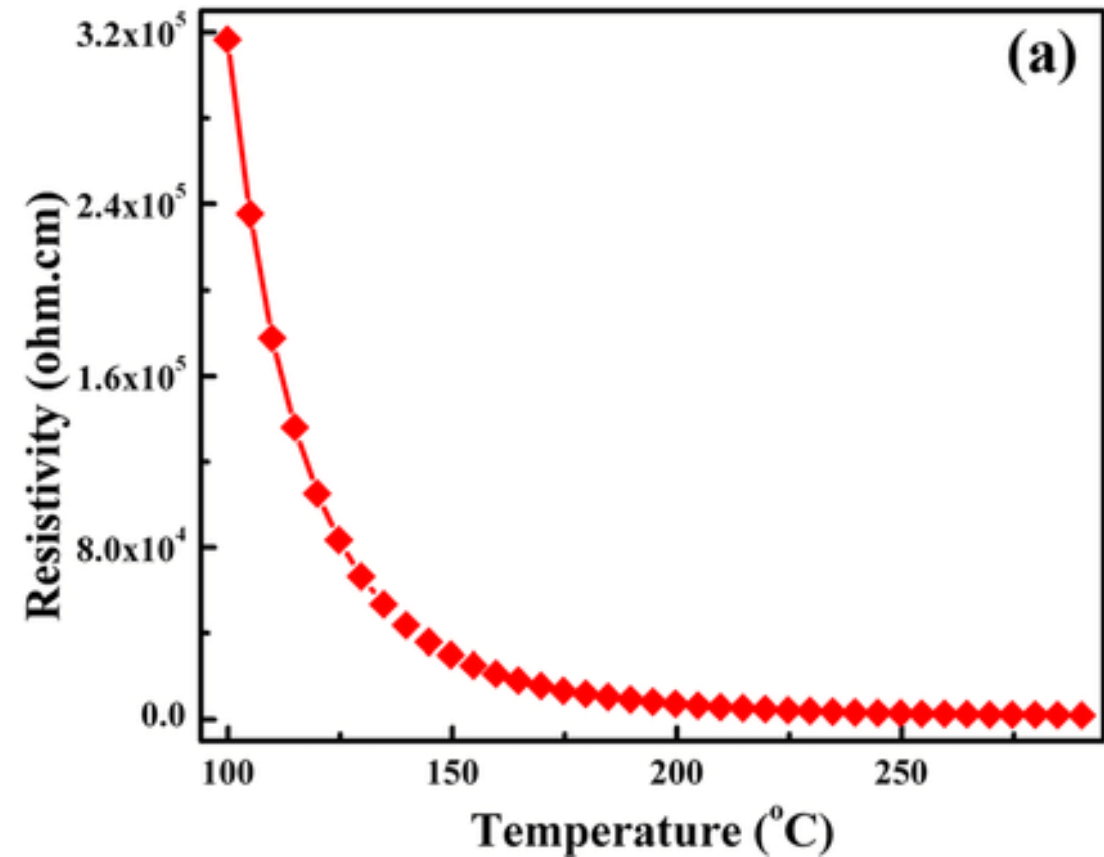
Per tali temperature, il termine  $\frac{1}{2}kT$  vale circa  $10^{-2} \text{ eV}$ .

Poiché, a parità di condizioni, la corrente che fluisce in un mezzo dipende (è proporzionale) alla densità di portatori di carica (vedere lezione 4), la resistività del materiale dipende dal suo reciproco

$$\rho \propto 1/n_i \propto T^{-\frac{3}{2}} \exp\left(\frac{\Delta E}{\frac{1}{2}kT}\right)$$

Questo spiega come per i semiconduttori intrinseci (caratterizzati da un valore relativamente piccolo di  $\Delta E$ ) la resistività sia molto minore che negli isolanti (con valori di  $\Delta E$  maggiori) e per entrambi diminuisca rapidamente con l'aumentare della temperatura).

In figura è mostrato nuovamente l'andamento della resistività del silicio in funzione della temperatura



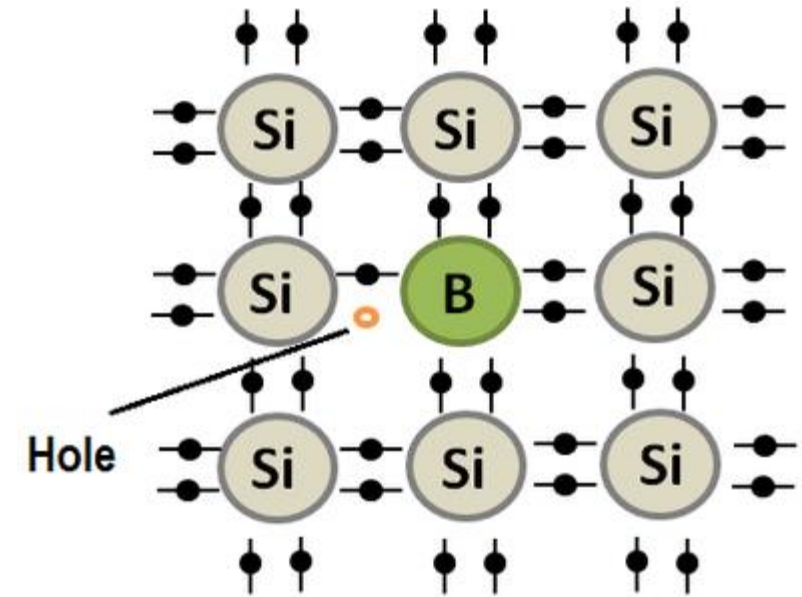
# Semiconduttori drogati

Il comportamento dei semiconduttori varia in modo significativa quando in un intrinseco vengono introdotte delle piccole frazioni di elementi chimici diversi (**impurezze**) con valenze diverse da quelle del materiale intrinseco.

Ad esempio, il silicio ha valenza 4, cioè 4 elettroni sono utilizzati da ciascun atomo nei legami con 4 atomi confinanti nel reticolo cristallino (la figura non tiene conto della struttura tridimensionale del reticolo!)

Se rimpiazziamo un atomo di silicio con uno di boro, che è trivalente, nei legami con gli atomi di silicio confinanti si crea una lacuna (uno dei livelli degli elettroni di valenza è vuoto).

Il **drogaggio** in questo caso viene chiamato **di tipo p** (positivo) e gli atomi di boro vengono chiamati **accettori** (perché mettono a disposizione livelli che possono accettare elettroni).



Dal punto di vista del diagramma a bande, gli accettori creano dei livelli nel gap proibito, con energie molto vicine al limite superiore della banda di valenza.

La differenza di energia  $E_B$  tra questi livelli e il limite superiore della banda di conduzione risulta essere molto minore della differenza di energia  $\Delta E$  tra i limiti delle bande di valenza e di conduzione.

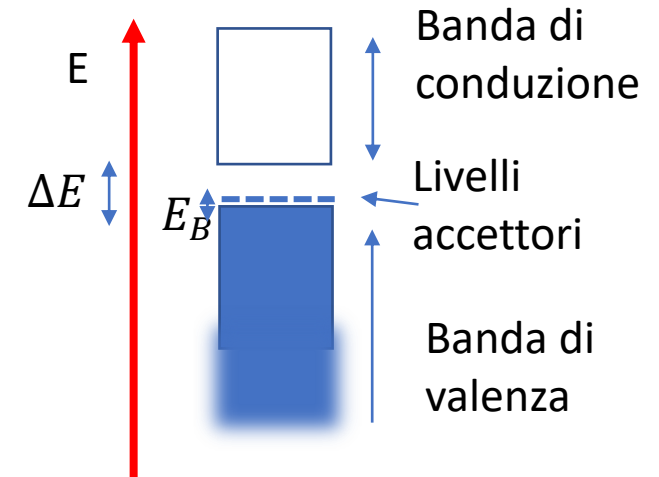
( $E_B$  viene chiamato così perché è l'energia di legame (bonding) dovuta alla diversa natura del drogante rispetto al materiale semiconduttore)

Ad esempio, per il silicio drogato con boro, risulta  $\Delta E = 1.2 \text{ eV}$  e  $E_B = 0.045 \text{ eV}$

Poiché la probabilità che degli elettroni vengano eccitati dalla banda di valenza ai livelli degli accettori decresce esponenzialmente con il rapporto  $E_B / \frac{1}{2} kT$ , ciò significa che i livelli dovuti alle impurezze vengono popolati molto rapidamente all'aumentare della temperatura.

A temperatura ambiente (T circa 300K) la quasi totalità di tali livelli risultano occupati, lasciando nella banda di valenza altrettante lacune.

In questo modo anche a temperature moderate, vi è una densità di lacune circa pari alla densità di accettori (impurezze tipo p), mentre la densità di elettroni di conduzione è trascurabile.

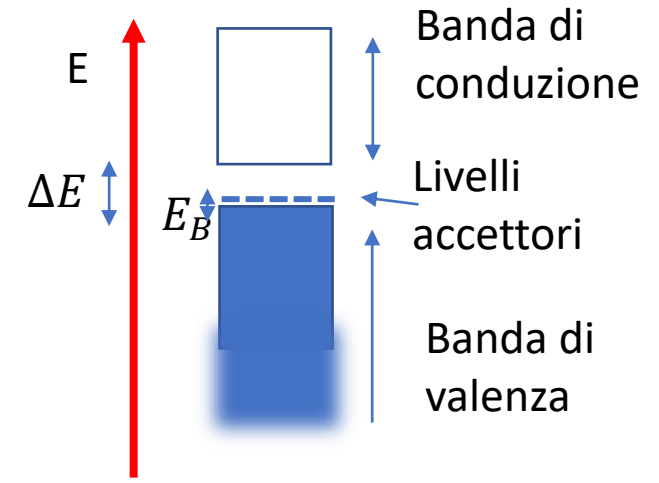


Risulta così che le **lacune in un semiconduttore di tipo p** le lacune sono i **portatori di carica di maggioranza**.

Il loro numero rimane più o meno costante, fino a che la densità degli elettroni eccitati termicamente nella banda di conduzione (e le lacune che lasciano dietro) non diviene significativa ed il loro contributo alla conduzione elettrica risulta essere comparabile a quello delle lacune associate agli elettroni dei livelli degli accettori.

In questo modo, la dipendenza della resistività del semiconduttore dalla temperatura ha andamenti diversi a bassa ed alta temperatura  $T$ : **per valori bassi di  $T$  la densità di portatori di carica è circa costante**, mentre **per valori più alti di  $T$** , il contributo degli elettroni eccitati in banda di conduzione diventa rilevante e **il numero dei portatori di carica aumenta**.

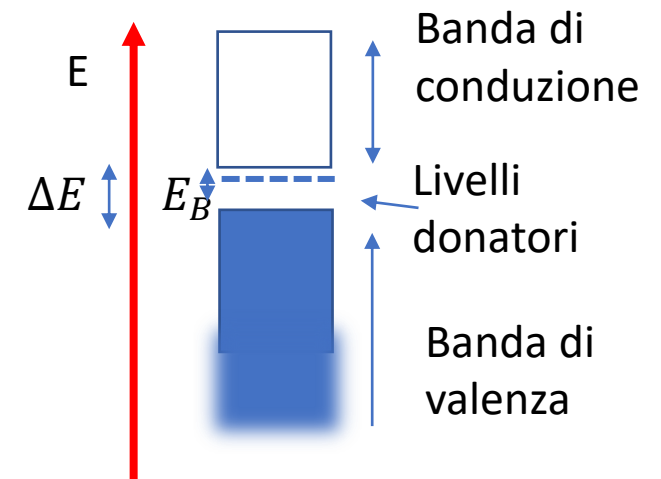
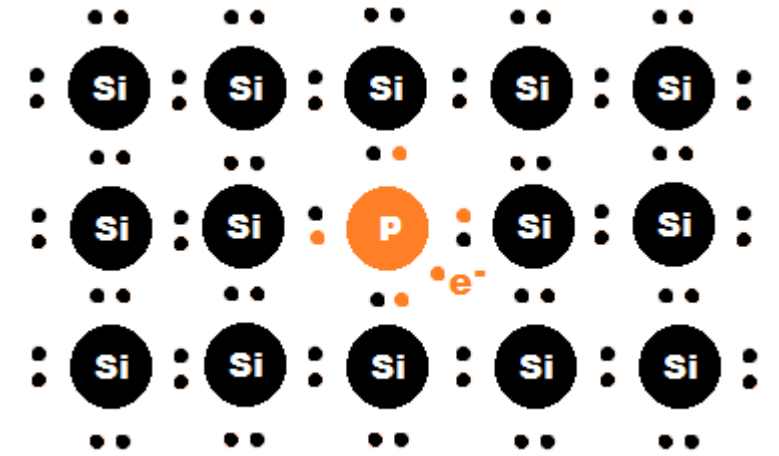
Vedremo i dettagli tra poco.



Nel caso invece che l'impurità sia pentavalente, come per il fosforo, il quinto elettrone di valenza del fosforo non è impegnato in un legame di valenza con gli atomi di silicio e risulta disponibile alla conduzione elettrica.

Il **drogaggio** in questo caso viene chiamato di **tipo n** (negativo) e gli atomi di fosforo vengono chiamati **donatori** (perché mettono a disposizione ulteriori elettroni di conduzione).

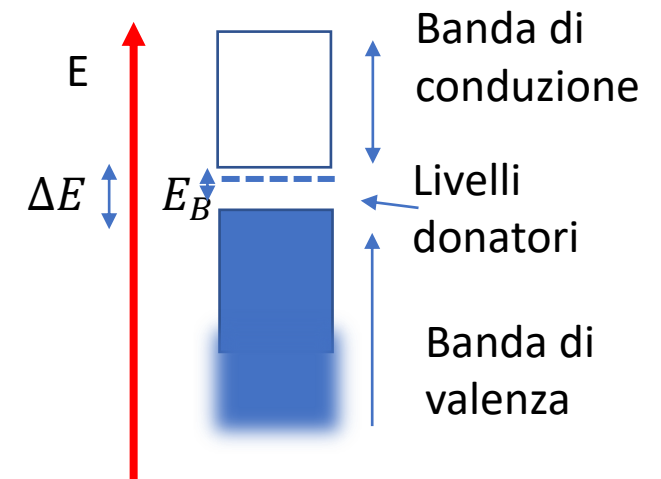
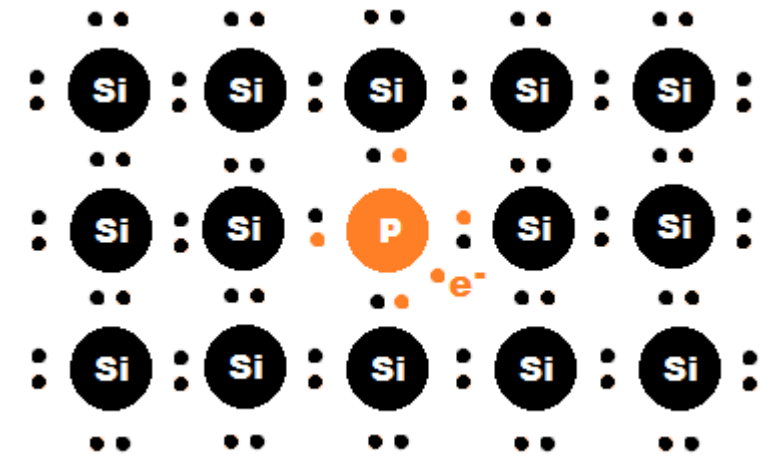
Nello spettro energetico vengono a crearsi dei livelli, sempre nel gap proibito, prossimi al confine inferiore della banda di conduzione (livelli dei donatori), separati da essa da una differenza di energia  $E_B$  che risulta molto più piccolo del gap  $\Delta E$ .



A causa del piccolo valore di  $E_B$  gli elettroni che riempiono i livelli dei donatori vengono facilmente eccitati termicamente nella banda di conduzione, anche a temperatura ambiente.

Ne segue che, anche a temperature moderate, la densità di elettroni di conduzione è dell'ordine della densità dei donatori, circa costante (la densità di lacune risulta trascurabile).

**Gli elettroni sono quindi i portatori di maggioranza per un semiconduttore di tipo n.**



Ove i **semiconduttori puri** vengono chiamati **intrinseci**, quelli **drogati (di tipo p o n)** vengono chiamati **estrinseci**.

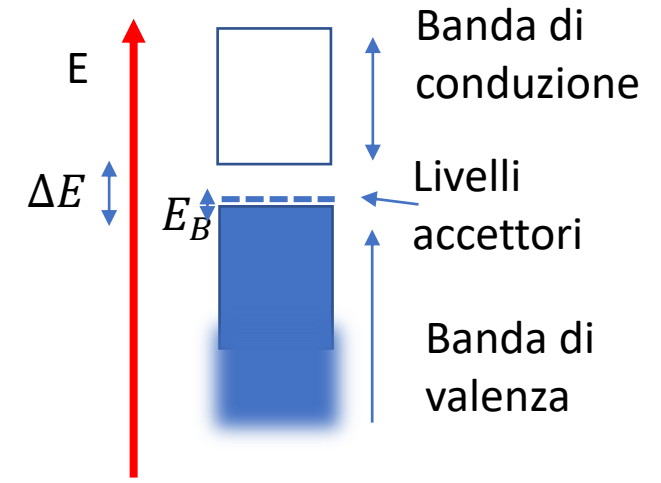
Tutti i semiconduttori estrinseci hanno la caratteristica che la differenza di energia  $E_B$  tra i livelli aggiunti nel gap e il confine della banda più vicina (di conduzione per il tipo n e di valenza per il tipo p, come in figura) è molto più piccola della differenza  $\Delta E$  tra le due bande.

Se confrontiamo il valore di  $E_B$  con quello di  $kT$  nell'espressione della densità degli elettroni eccitati termicamente dalla banda di valenza ai livelli degli accettori

$$n \propto T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-E_B / \frac{1}{2} kT\right)$$

(perfettamente analoga a quella per la densità di elettroni eccitati termicamente nei semiconduttori estrinseci) vediamo che l'argomento dell'esponentiale per  $T$  dell'ordine di 300 K ha un valore di qualche unità, mentre tipicamente  $\Delta E / \frac{1}{2} kT$  è dell'ordine delle decine e quindi l'eccitazione termica dalla banda di valenza a quella di conduzione è fortemente depressa rispetto a quella ai livelli delle impurità.

Questo **regime** viene chiamato **estrinseco** ed è quello in cui la **conduzione è dovuta** essenzialmente **ai portatori di maggioranza** del tipo di drogaggio (**p o n**).





Nel **regime estrinseco** il numero di portatori è più o meno costante e **la resistività aumenta con l'aumentare della temperatura**.

Questo perché l'eccitazione termica degli ioni nei nodi reticolari del materiale li fa vibrare, rendendo più probabile che i portatori di carica interagiscano con loro e quindi perdano energia (come nei metalli): la corrente tende a diminuire.

**La densità di portatori di carica** in questo regime **dipende** essenzialmente **dalla percentuale di drogante** aggiunto al materiale. Per avere una idea di quali siano tipicamente queste percentuali, prendiamo il caso del silicio.

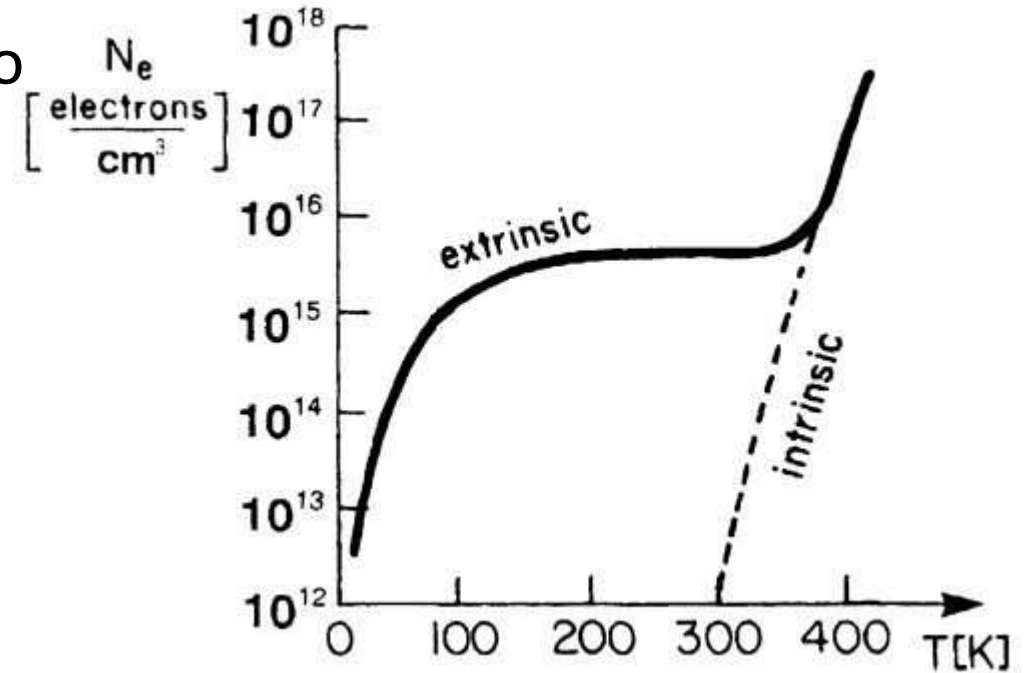
Come semiconduttore intrinseco, il silicio a temperatura ambiente ha una densità di elettroni eccitati alla banda di conduzione  $n_i \cong 10^{10} \text{cm}^{-3}$  (numero di portatori per cm cubo).

Per avere un comportamento estrinseco, si usa drogare il silicio in modo tale che le impurità abbiano una densità che varia da  $10^{13} \text{cm}^{-3}$  a  $10^{18} \text{cm}^{-3}$  e quindi i portatori di carica maggioritari siano da  $10^3$  a  $10^8$  più numerosi di quelli dovuti all'eccitazione degli elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione.

In un cm cubo di silicio però ci sono circa  $5 \cdot 10^{22}$  atomi: la percentuale del drogante risulta pari al rapporto tra la sua densità e questo numero, variando quindi tra  $10^{-9}$  e  $10^{-4}$ . Una quantità estremamente piccola!

Per temperature ancora maggiori il numero di elettroni che passano dalla banda di valenza a quella di conduzione aumenta.

Per le percentuali di drogante più piccole il contributo di questi elettroni (e delle associate lacune) alla conduzione elettrica può diventare rilevante e **la resistività diminuisce con l'aumentare della temperatura**: è il cosiddetto **regime intrinseco** del semiconduttore drogato.



In figura viene schematizzata la situazione per silicio drogato di tipo n, per concentrazioni basse di drogante: il numero di portatori aumenta esponenzialmente per temperature superiori ad un certo valore di soglia, che dipende dalla percentuale di drogante.

# Ed ora un po' di cinema

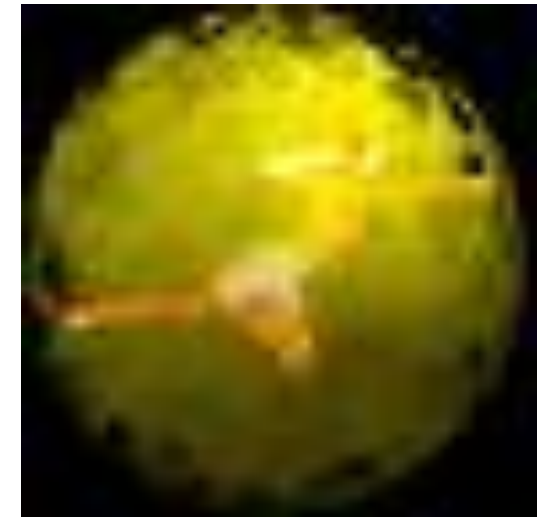
## The PN Junction. How Diodes Work?

<https://www.youtube.com/watch?v=JBtEckh3L9Q>



## Semiconductors - Physics inside Transistors and Diodes

<https://youtu.be/hrpPKCDLRN0?t=65>



Physics Videos by Eugene Khutoryansky