

Le basi della tecnologia moderna: la FISICA dei SEMICONDUTTORI

Federico Grasselli

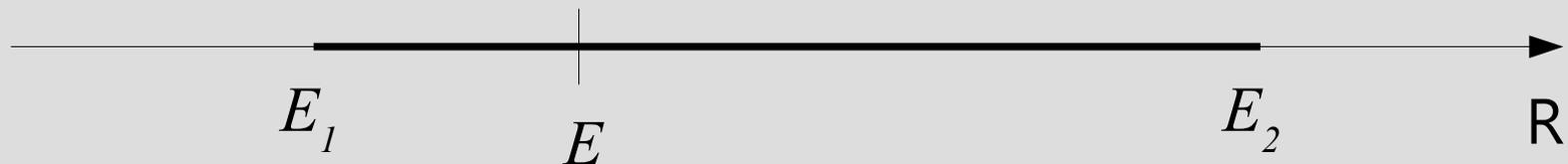
Dipartimento di Fisica
Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia

Teoria delle bande

Principi quantistici della materia

- La fisica classica tratta le grandezze fisiche misurabili (osservabili) come continue:
 - es.: potete variare *con continuità* l'energia di un satellite orbitante attorno a un pianeta; l'energia del satellite può, in linea di principio, assumere *ogni valore reale* in un certo intervallo di dominio.

$$E \in [E_1, E_2] \subseteq \mathbb{R}$$



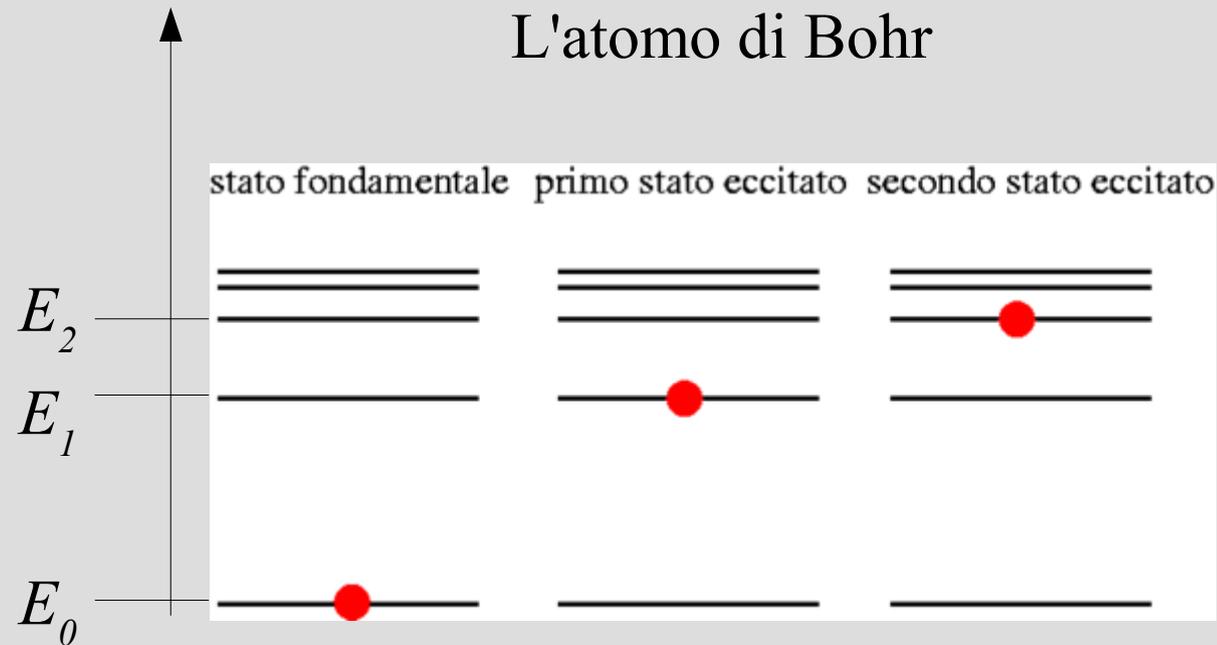
Teoria delle bande

Principi quantistici della materia

- Nella fisica quantistica l'energia misurata assume, per sistemi legati, valori discreti:
 - es.: un elettrone “orbitante” attorno a un nucleo atomico ha solo un insieme discreto di energie: l'energia risulta quantizzata.
 - L'insieme delle energie può essere messo in corrispondenza con l'insieme dei naturali (numerabilità) → Numeri Quantici.

Teoria delle bande

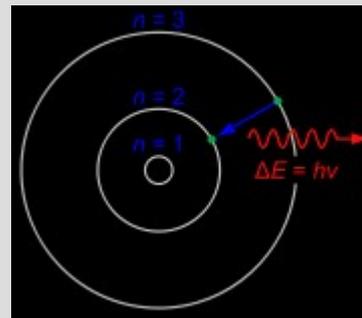
Principi quantistici della materia



$$E_n = -Z^2 \frac{E_{0,H}}{(n+1)^2}$$

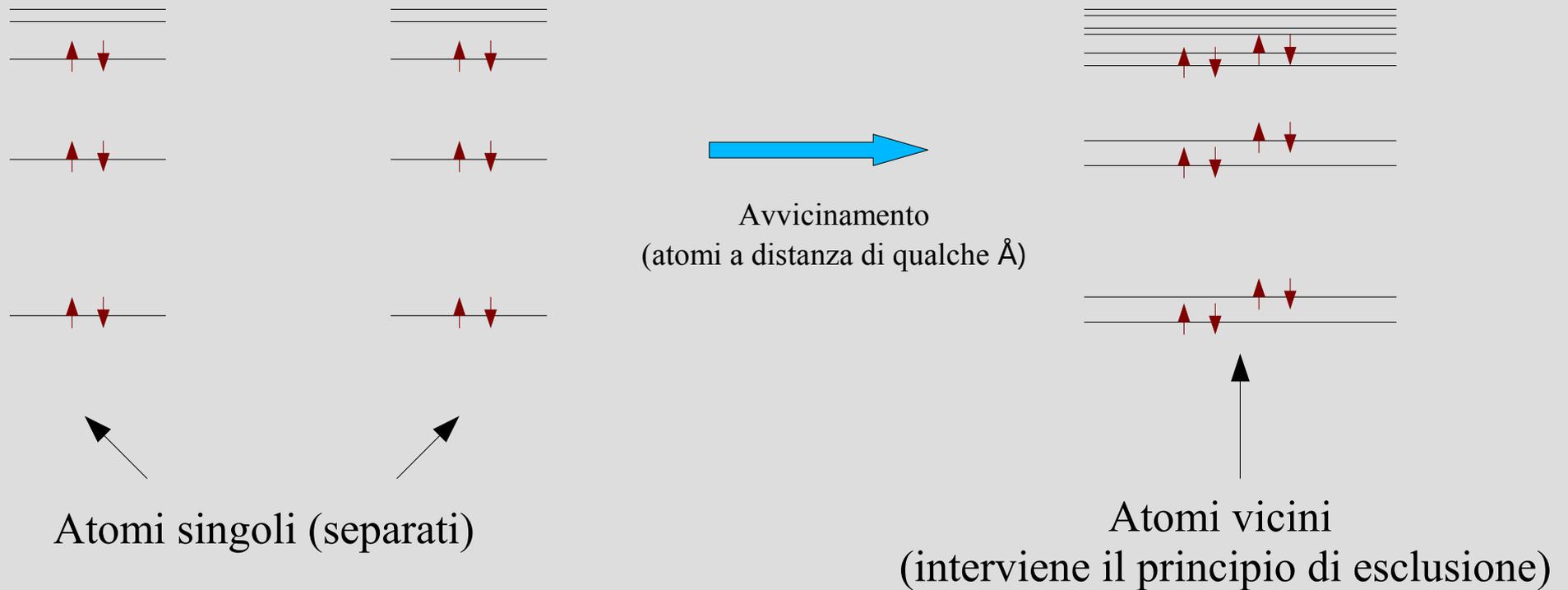
$$E_{0,H} \approx 13.6 \text{ eV}$$

$$n \in \mathbb{N}_0$$



Teoria delle bande

Split dei livelli energetici



- Addensamento dei livelli di energia
- Livelli non più di singolo atomo, ma livelli comuni del sistema poliatomico

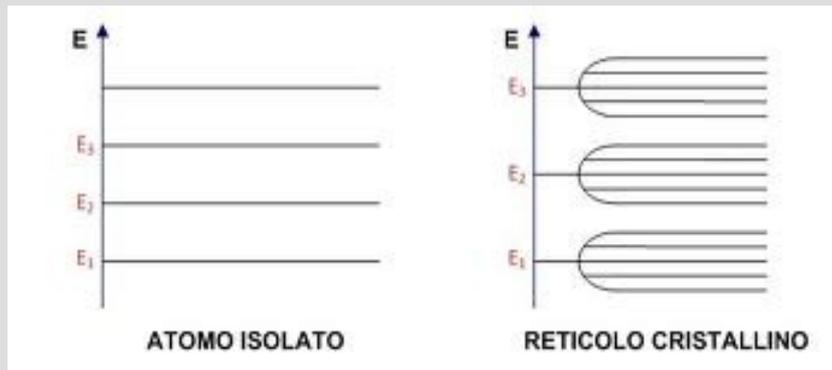
Teoria delle bande

Formazione delle bande

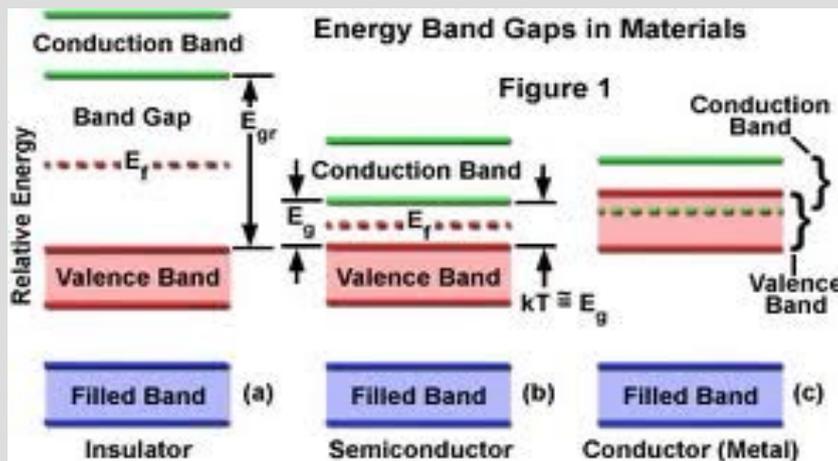
- Avvicinamento di un elevato numero N di atomi legati nel solido \rightarrow ogni livello orbitale atomico esterno si separa in N livelli molto vicini tra loro condivisi dal solido.
- Solo gli elettroni di valenza (quelli meno legati al nucleo) si trovano in stati condivisi.
- Gli elettroni più legati al nucleo rimangono nei loro orbitali atomici \rightarrow NO splitting.

Teoria delle bande

Formazione delle bande

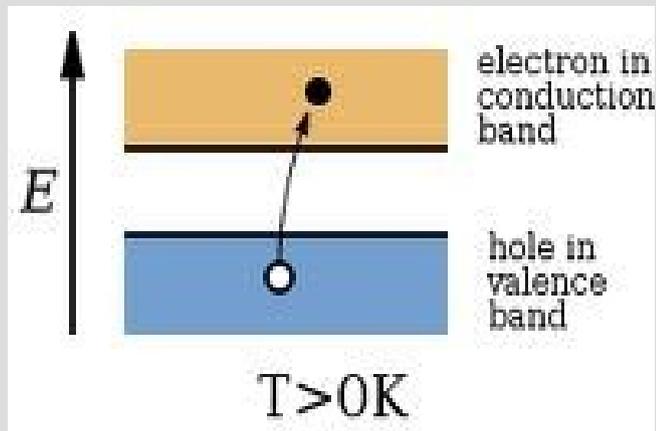


- Livello (energia) di Fermi: livello separatorio tra livelli occupati da e^- e livelli non occupati.
- Banda di VALENZA: banda occupata a $T=0$ K (responsabile dei legami).
- Banda di CONDUZIONE: banda di livelli non occupati a $T=0$ K (responsabile della conduzione).
- Conduttori (metalli): V.B. e C.B. si sovrappongono.
- Semiconduttori: V.B. e C.B. sono separate da un *gap energetico* di 1 eV ca.
- Isolanti: V.B. e C.B. sono separate da un *gap energetico* di 6 eV ca.
- Il *gap energetico* è una banda proibita di energia per l'elettrone. Nessun livello energetico pieno o vuoto è permesso in esso.

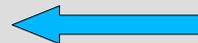


Teoria delle bande

Elettroni e lacune nei semiconduttori



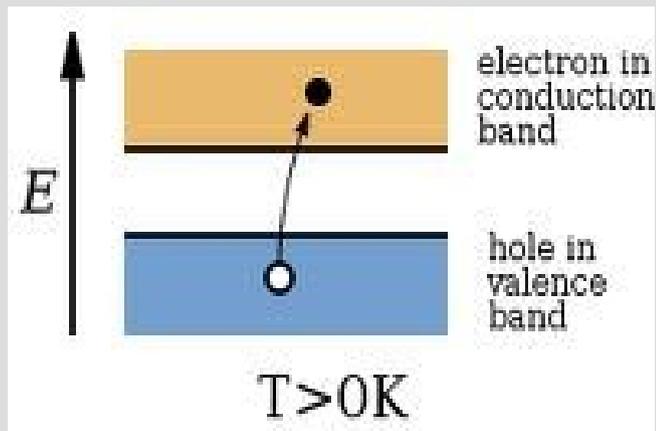
$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$



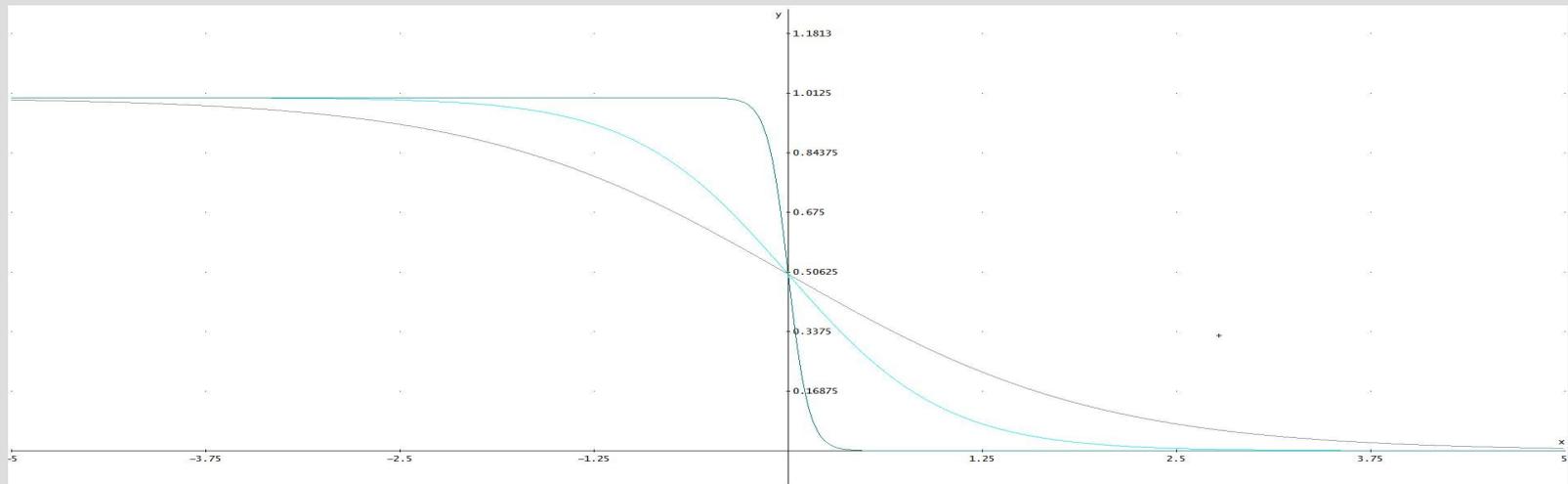
- A *bassa temperatura* solo i *conduttori* (metalli) conducono.
- Per temperature T significativamente $> 0 K$, in un *semiconduttore*, può accadere che, per effetti termici, un elettrone “salta” in banda di conduzione.
- Anche a temperature alte nei materiali *isolanti* l'energia termica fornita a un elettrone non è sufficiente a permettere un salto in banda di conduzione.
- Funzione di distribuzione di Fermi: esprime la *probabilità* che un elettrone (in generale un fermione) si trovi a una energia E .

Teoria delle bande

Elettroni e lacune nei semiconduttori



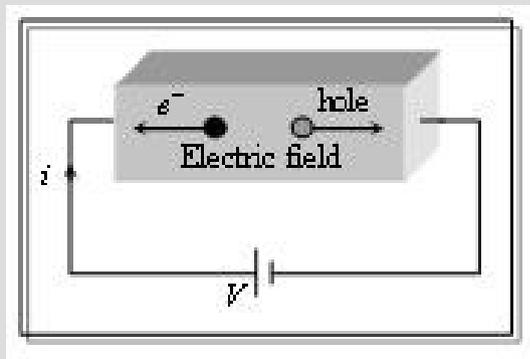
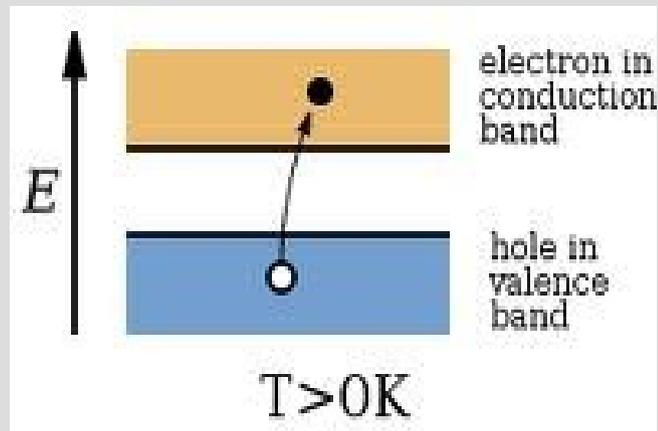
$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$



In ascissa l' ENERGIA dell'elettrone (in unità arbitrarie)

Teoria delle bande

Elettroni e lacune nei semiconduttori

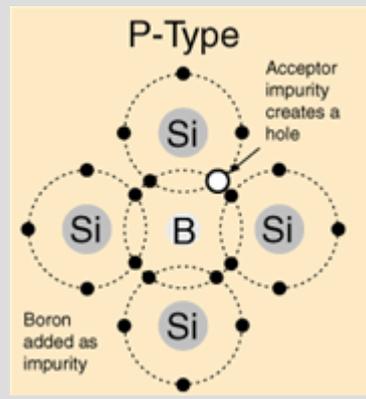
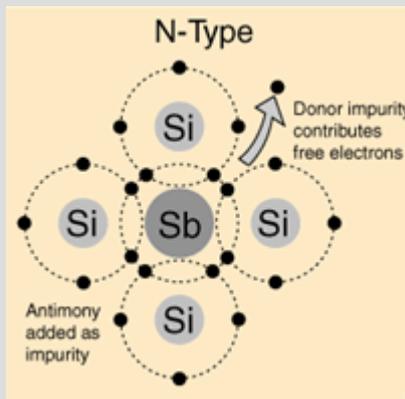
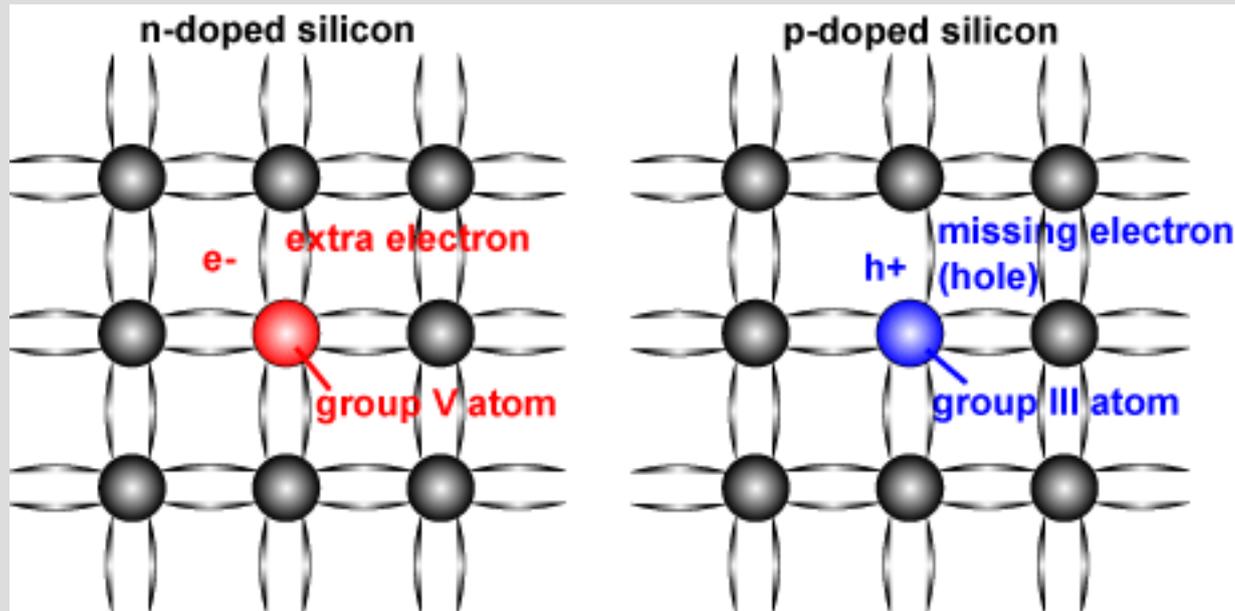


- Passando in banda di conduzione, l'elettrone diventa sostanzialmente libero di muoversi all'interno del solido → se si applica una tensione, si avrà una CORRENTE.
- L'elettrone lascia una vacanza nella banda di valenza detta *lacuna*, che può essere considerata come una particella con carica e positiva.
- La corrente in un conduttore è *unipolare*, generata dal moto dei soli elettroni, già in banda di valenza per definizione di conduttore.
- La corrente in un semiconduttore è *bipolare*, generata sia dagli elettroni, sia dalle lacune.

$$I_{totale} = I_{elettroni} + I_{lacune} \propto \Delta V$$

Teoria delle bande

Drogaggio dei semiconduttori



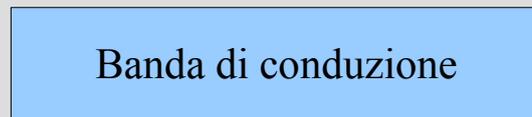
- Considerando un semiconduttore come Si o Ge (IV gruppo), se viene drogato con atomi pentavalenti (V gruppo: P, As, Sb) nel solido verrà ad esserci un eccesso di elettroni.
- Se il semiconduttore tetravalente viene drogato con elementi trivalenti (III gruppo: B, Ga, In) ci sarà una carenza di elettroni di legame con un conseguente eccesso di lacune.
- Il solido drogato è complessivamente neutro: è infatti composto da atomi neutri, non da ioni.
- L'eccesso o il difetto di elettroni fa sì che per il solido sia più o meno facile portare questi ultimi in banda di conduzione.
- Si vengono a formare nuovi livelli energetici per gli elettroni forniti dalle impurità droganti. Tali livelli sono discreti, in quanto si suppone che le impurità siano tra loro lontane.

Teoria delle bande

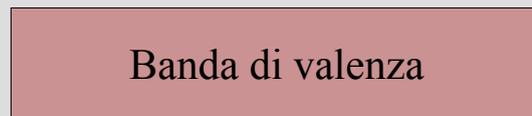
Drogaggio dei semiconduttori

- Nei semiconduttori ***n*** si ha un alto numero di “elettroni liberi” in banda di conduzione (a $T > 0$ K quasi tutti gli elettroni del nuovo livello saltano nella banda di conduzione).
- Nei semiconduttori ***p*** si ha un alto numero di “lacune libere” in banda di valenza (a $T > 0$ K è facile che un elettrone della banda di valenza salti nel nuovo livello generato dai droganti trivalenti).

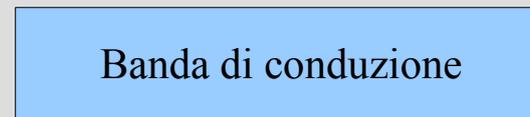
Drogaggio ***n***



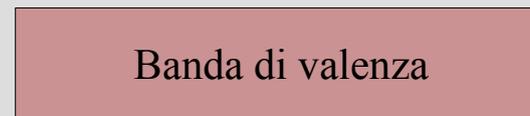
Nuovo livello



Drogaggio ***p***



Nuovo livello

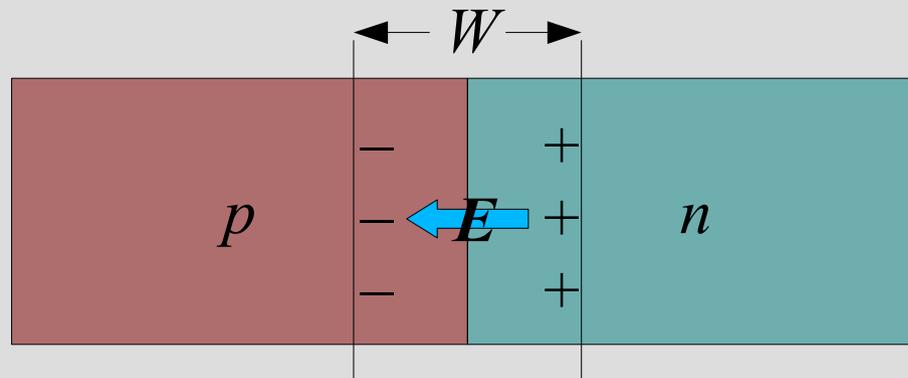


Teoria delle bande

La giunzione $p-n$

Mettiamo a contatto una regione drogata p con una drogata n :

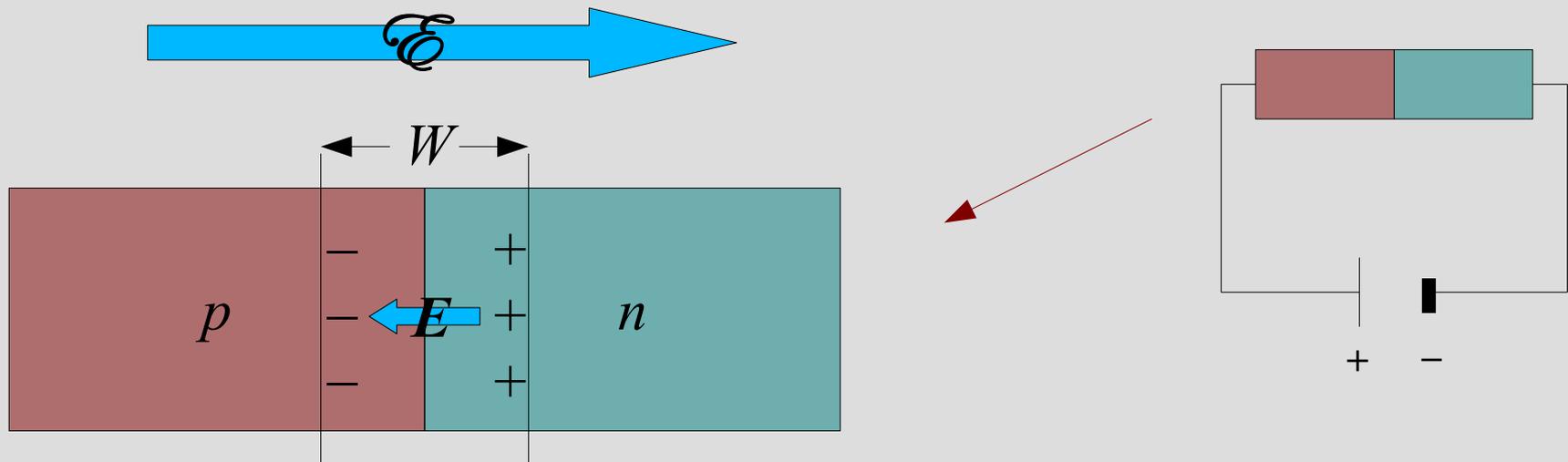
- Nella regione spaziale W prossima alla giunzione gli elettroni tendono a ricombinarsi con le lacune. Ciò fa sì che W si svuoti dei portatori maggioritari (e^- nella zona n , lacune nella zona p). W diventerà una regione carica (positivamente nella zona n perché si sono persi e^- , negativamente nella zona p perché si sono perse lacune).
- W è detta regione di *svuotamento* o di *carica spaziale*.
- In W si assiste alla formazione di un campo elettrostatico E diretto dalla zona n alla zona p .



Teoria delle bande

La giunzione $p-n$

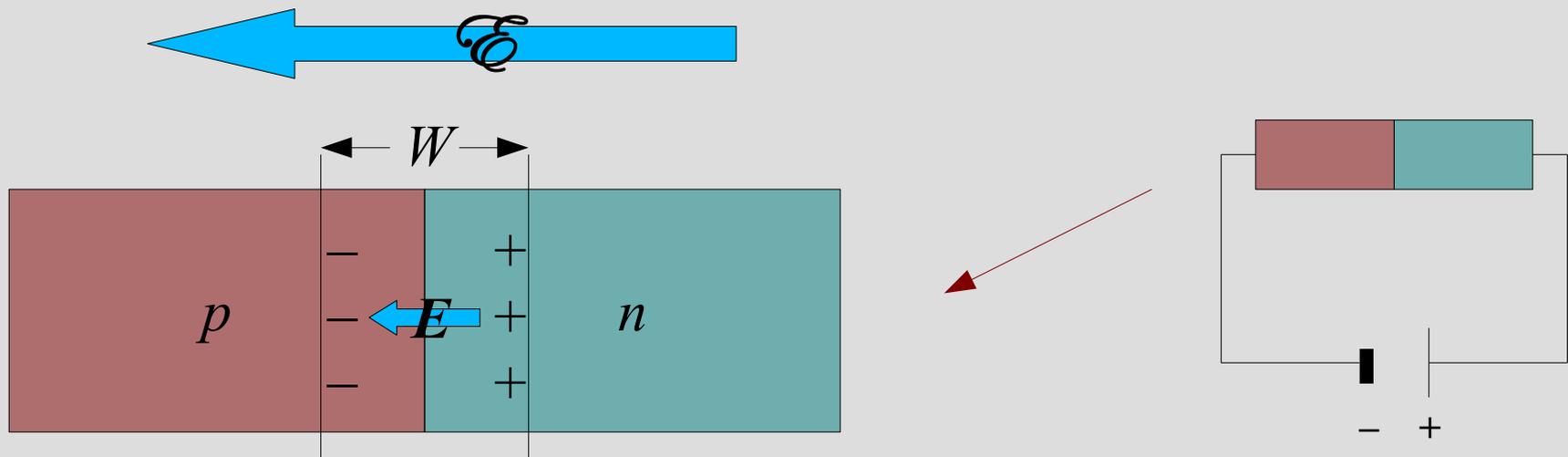
- A causa di E le lacune in eccesso in p e gli elettroni in eccesso in n trovano difficoltà a passare (rispettivamente da p a n e da n a p) al di là della giunzione.
- Se però attacchiamo la parte p al polo positivo di una pila e la parte n al polo negativo, allora il contro-campo \mathcal{E} generato dalla differenza di tensione della pila (qualche Volt) si opporrà a E . Se \mathcal{E} è sufficientemente intenso, permetterà il passaggio dei portatori di carica.
- Si parlerà in tal caso di *polarizzazione diretta* della giunzione.



Teoria delle bande

La giunzione $p-n$

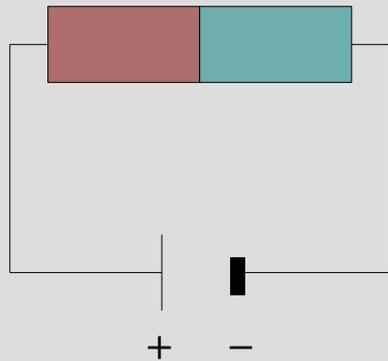
- Se invece attacchiamo la parte p al polo negativo di una pila e la parte n al polo positivo, allora il campo \mathcal{E} generato dalla differenza di tensione della pila (qualche Volt) si sommerà a E . Il passaggio dei portatori di carica maggioritari risulterà ulteriormente interdetto.
- Si parlerà in tal caso di *polarizzazione inversa* della giunzione.



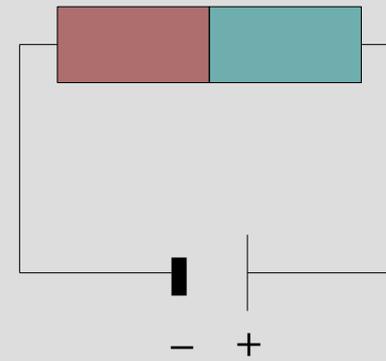
Dispositivi a semiconduttore

Il diodo a semiconduttore

- Il dispositivo più semplice basato sulla giunzione p - n è il diodo.
- In realtà la fabbricazione di un diodo non avviene unendo un pezzo di semiconduttore p con un pezzo di semiconduttore n , ma facendo *diffondere* impurità p da un lato di un cristallo n (o viceversa).
- Piccole dimensioni (fino a poche decine di nanometri).
- Alta resistenza a sollecitazioni meccaniche.
- A seconda che la polarizzazione sia diretta o inversa, il diodo rispettivamente permetterà o impedirà il passaggio di corrente.



Polarizzazione diretta



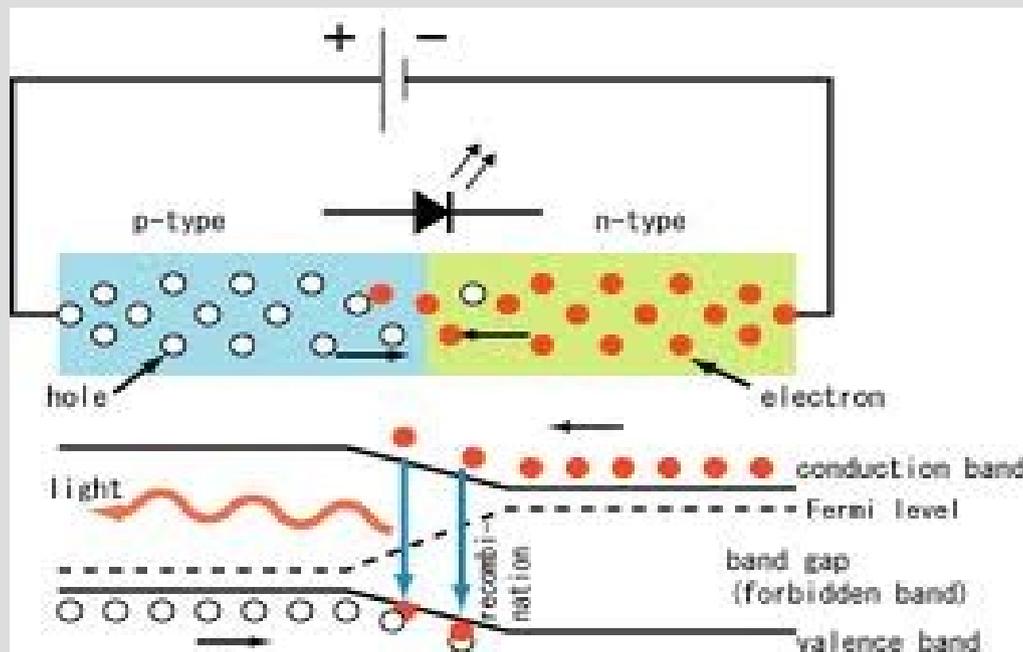
Polarizzazione inversa

Dispositivi a semiconduttore

Il diodo a emissione di luce (LED)

La descrizione del LED può essere vista in due modi.

- I. Un urto tra un elettrone e una lacuna, visti entrambi come particelle, con conseguente annichilazione ed emissione di energia sotto forma di un fotone.
- II. Un elettrone si diseccita dalla banda di conduzione, ricadendo in banda di valenza. Per la conservazione dell'energia verrà emesso un fotone.



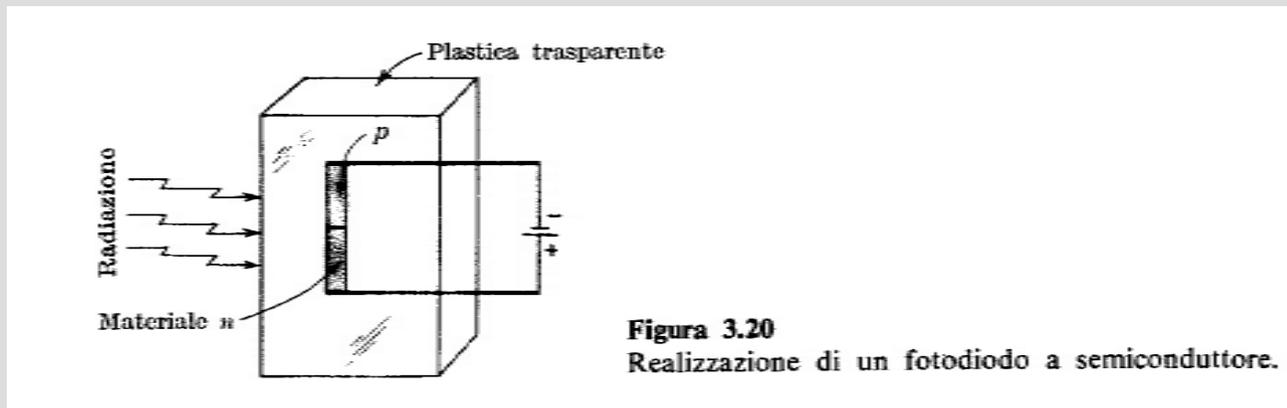
$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

Dispositivi a semiconduttore

Il fotodiode

Il principio di funzionamento del fotodiode è l'opposto di quello del LED:

- La radiazione luminosa incide sulla giunzione. L'energia della radiazione viene assorbita da un elettrone in banda di valenza, il quale “salta” in banda di conduzione. Viene dunque a formarsi una coppia elettrone-lacuna ulteriore che incrementa la corrente.
- In modo analogo funziona un pannello solare fotovoltaico.



Dispositivi a semiconduttore

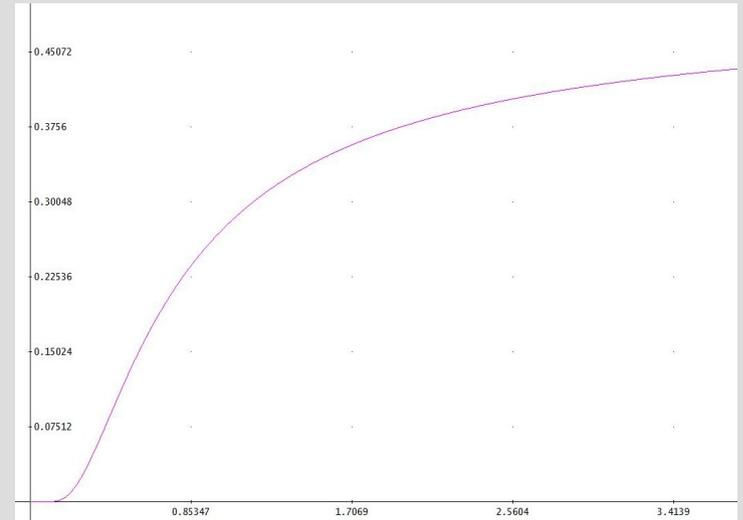
Il termistore

Nel termistore l'energia è fornita non dalla radiazione luminosa, ma da effetti termici.

- La probabilità di formazione di una coppia elettrone lacuna a seguito del salto di un elettrone in banda di conduzione cresce con la temperatura (*funzione di distribuzione di Fermi*):

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

In ascissa la TEMPERATURA (in unità arbitrarie)



L'andamento tipo $e^{-1/x}$ permette la fabbricazione di strumenti particolarmente sensibili (la corrente varia notevolmente anche per piccole variazioni di T).