



**Sommario**

Configurazione elettronica dell'atomo..... 2  
Elettroni di valenza ..... 5  
Gruppo dei semiconduttori ..... 6  
Struttura atomica del silicio ..... 8  
Drogaggio dei semiconduttori ..... 13  
Semiconduttori di tipo n e di tipo p..... 15

# Configurazione elettronica dell'atomo

---

Secondo il modello di atomo di N. Bohr e A. Sommerfeld le orbite sulle quali si possono muovere gli elettroni in condizioni di equilibrio non sono in numero illimitato. In altre parole, agli elettroni non sono concesse tutte le possibili orbite, ma soltanto alcune, alle quali corrisponde un determinato valore di energia.

Inoltre, le orbite elettroniche non sono egualmente distanziate tra loro, ma sono raggruppate in **strati o anelli elettronici** contrassegnati, procedendo dall'interno verso l'esterno, con le lettere **K, L, M, N, O, P, Q**.

Poiché su ciascuna orbita possono coesistere al massimo due elettroni, e poiché il numero di orbite comprese in ogni strato è dato da:

$$\text{numero orbite elettroniche per strato} = n^2$$

dove:  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$

ne consegue che il massimo numero di elettroni che può essere contenuto nei singoli strati è:

$$\text{numero massimo elettroni per strato} = 2 n^2$$

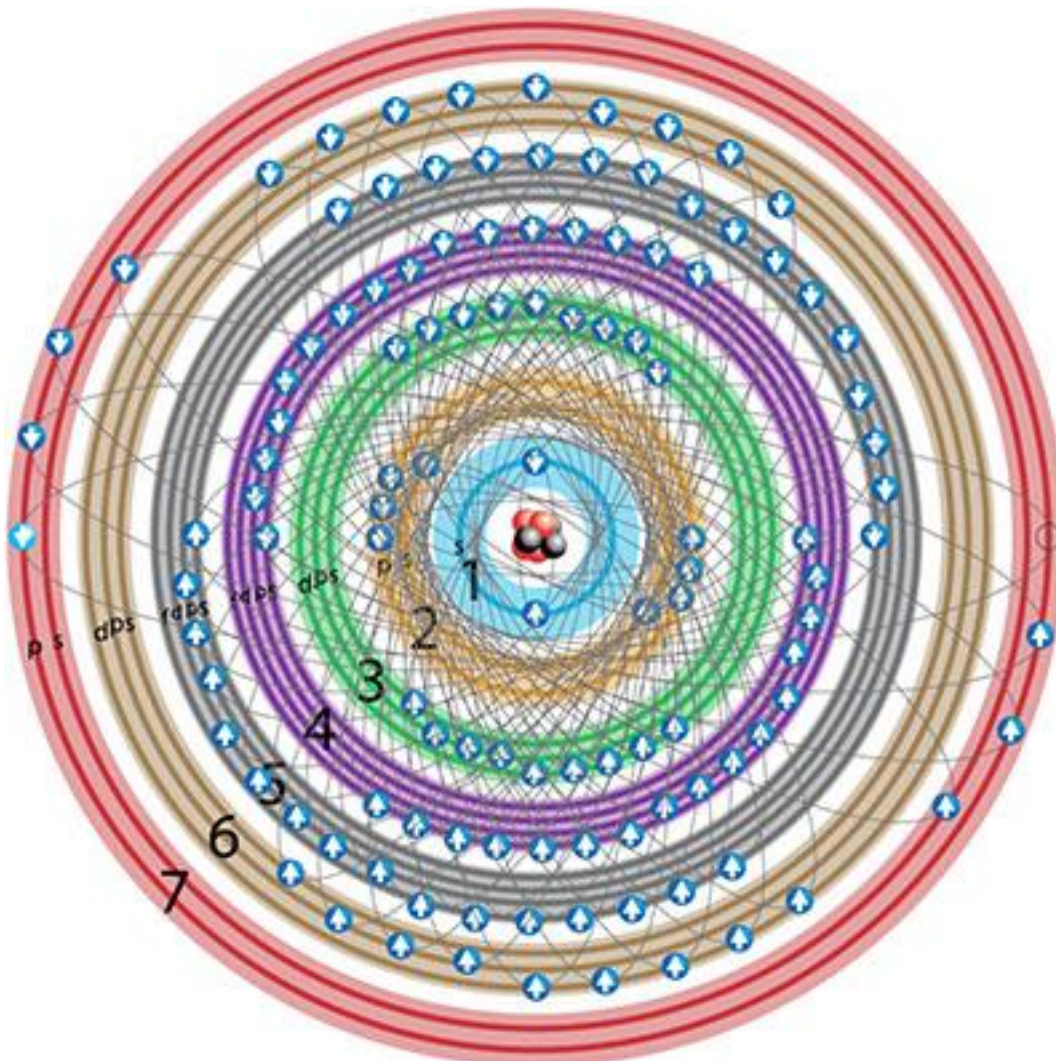
dove:  $n = 1$  per lo strato K,  $2$  per lo strato L,  $3$  per lo strato M, ...

Nella tabella che segue è mostrata la ripartizione delle orbite e degli elettroni nei singoli strati.

## Ripartizione di orbite ed elettroni nell'atomo

Strato	Numero orbite	Numero max elettroni
K (1)	1	2
L (2)	4	8
M (3)	9	18
N (4)	16	32
O (5)	25	50
P (6)	36	72
Q (7)	49	98








La struttura dell'atomo è quindi così schematizzabile:



Procedendo in questa rappresentazione per tutti gli elementi della tavola periodica, si giunge a una constatazione molto interessante: **non esistono, in natura, elementi i cui atomi abbiano più di 8 elettroni nell'ultimo strato.**

H																He	
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac															

	Metalli alcalini		Non Metalli		Metalli di transizione		Gas nobili
	Metalli alcalino-terrosi		Metalli di transizione		Alogeni		

Per esempio, nell'atomo di sodio gli strati K e L sono saturati, mentre lo strato M contiene 1 elettrone; nell'atomo di cloro gli strati K e L sono saturati e nello strato M vi sono 7 elettroni. Nella tavola periodica, dopo il cloro viene l'argo, che è un gas nobile e, avendo 8 elettroni nell'ultimo strato (ottetto completo), non reagisce chimicamente.

Esclusi i quattro gas nobili, neon, argo, cripto, xeno (l'elio ha solo due elettroni che saturano lo strato K), tutti gli altri elementi hanno meno di 8 elettroni nell'ultimo strato.

Da questo punto di vista, gli elementi possono essere ripartiti in tre grandi categorie:

- 1) elementi che hanno nell'ultimo strato **meno di 4 elettroni** (oltre all'idrogeno, a questa categoria appartengono i metalli, che sono notoriamente buoni conduttori);
- 2) elementi che hanno nell'ultimo strato **4 elettroni** (di questa categoria fanno parte, per esempio, il carbonio, il silicio, il germanio, le cui proprietà elettriche sono intermedie fra quelle dei conduttori e quelle degli isolanti e sono quindi definiti semiconduttori);
- 3) elementi che hanno nell'ultimo strato **da 5 a 7 elettroni** (a questa categoria appartengono i metalloidi, escluso l'idrogeno, che notoriamente non sono buoni conduttori di elettricità).

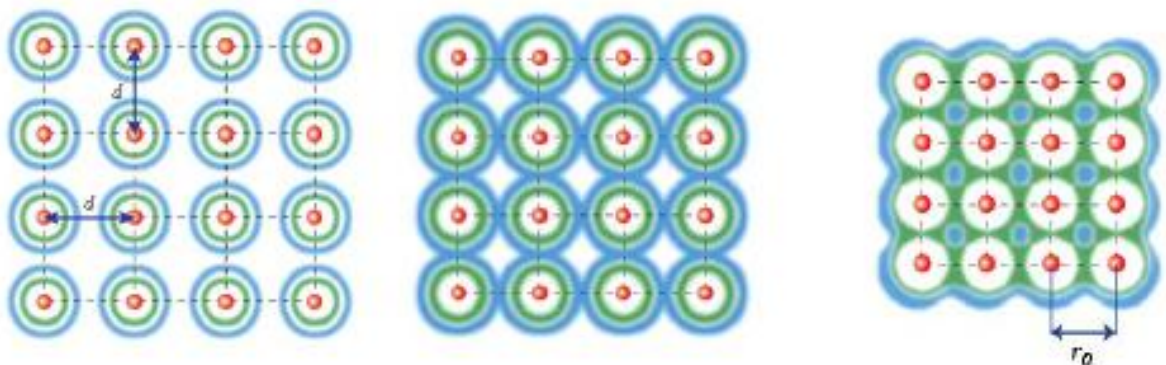
## Elettroni di valenza

Gli elettroni più interni che occupano sottostrati completi sono i più legati al nucleo e pertanto non prendono parte ai fenomeni fisici o chimici, se non all'emissione e all'assorbimento di raggi X. La struttura degli elettroni interni (che con il nucleo costituiscono il nocciolo ionico) rimane quindi inalterata anche quando l'atomo trasforma la sua nube elettronica per combinarsi con altri atomi a formare molecole o solidi.

Gli elettroni più esterni, in genere in un sottostrato incompleto, sono invece responsabili del legame chimico, dell'interazione degli atomi con la luce, quindi degli spettri di assorbimento e di emissione, e determinano le proprietà dei materiali. Essi sono detti elettroni di valenza.

Nella formazione delle molecole si ha la transizione da elettroni di valenza localizzati intorno agli atomi (orbitali atomici) a elettroni distribuiti su tutto lo spazio occupato dalla molecola (orbitali molecolari). Analogamente nella formazione dei solidi, gli orbitali atomici si fondono a formare orbitali cristallini, estesi a tutto lo spazio occupato dal solido. Gli elettroni di valenza nei solidi, dunque, non sono più legati ai singoli atomi, ma sono delocalizzati.

La sequenza sottostante (da sinistra a destra) mostra qualitativamente come cambia la distribuzione di densità elettronica quando si passa dagli atomi separati agli atomi interagenti e legati a formare un reticolo cristallino:



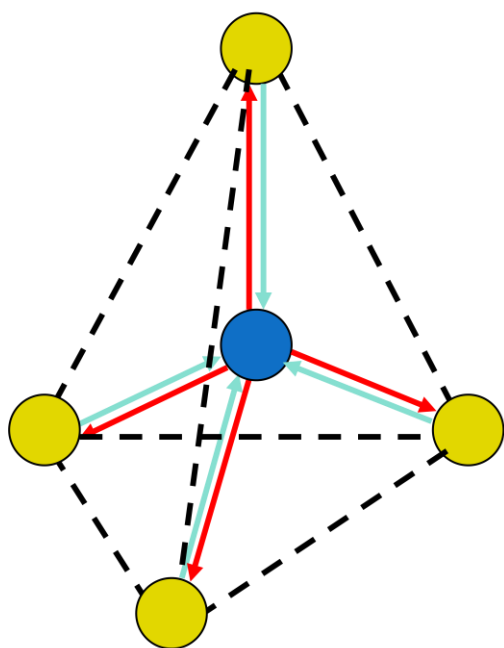
Quando gli atomi si trovano aggregati in strutture complesse per mezzo dei legami, i livelli più esterni, quelli degli elettroni di valenza, si deformano per azione degli atomi vicini trasformandosi in bande caratterizzate da una certa ampiezza. La banda di valenza contiene elettroni legati, mentre quella di conduzione contiene elettroni liberi di spostarsi nel cristallo.



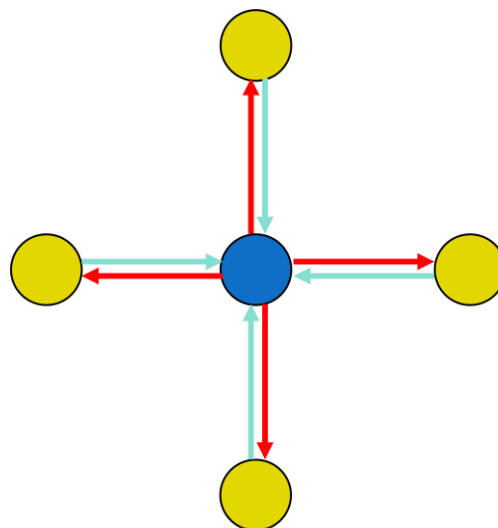


## Struttura atomica del silicio

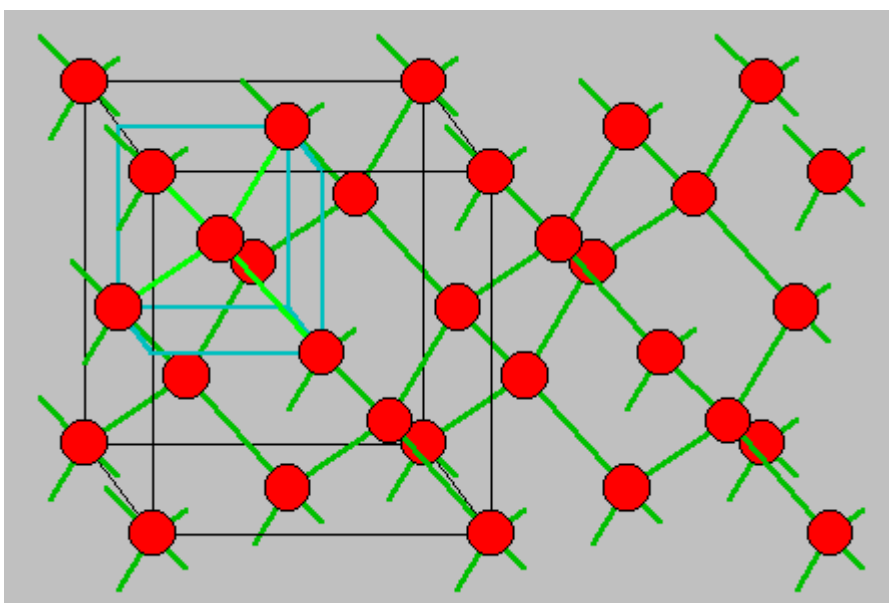
Il silicio è un elemento che, allo stato puro, si presenta in forma cristallina. Entro ciascun cristallo, gli atomi di silicio sono disposti in un reticolo spaziale e ciascuno di essi è legato a 4 atomi vicini, posti al vertice di un tetraedro regolare, in modo che la distanza fra 2 atomi qualunque è sempre la medesima.



**Cella tetraedrica**

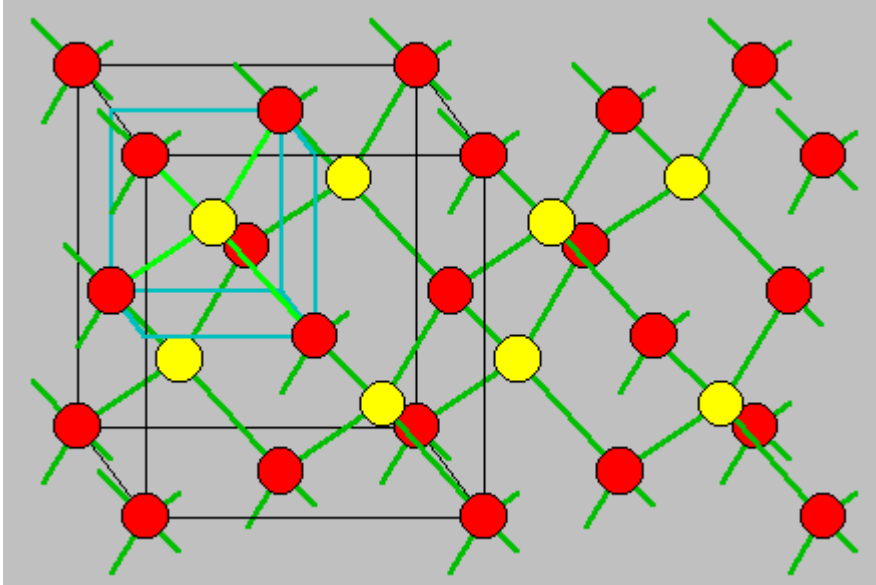


**Modello bidimensionale**





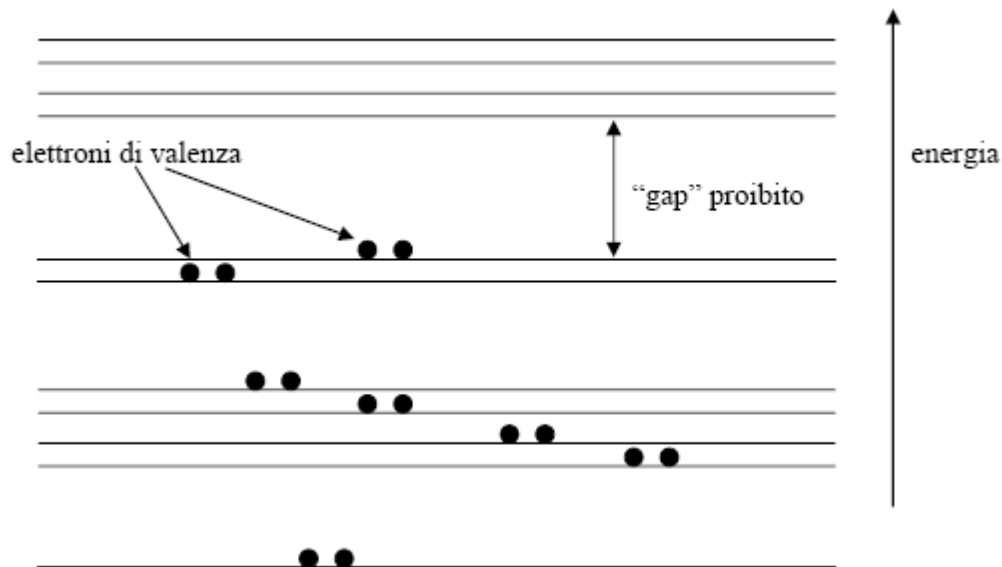
Analoga struttura mostrano, ad esempio, i cristalli di arseniuro di gallio (GaAs), un altro dei materiali semiconduttori universalmente usato nella tecnologia elettronica, solo che ogni atomo di un tipo è legato ad un atomo dell'altro tipo:



Il **gallio (Ga)** è un elemento trivalente, mentre l'**arsenico (As)** è pentavalente, i loro elettroni di valenza, in tutto otto, danno al composto la struttura stabile dell'ottetto in modo del tutto simile a quanto avviene per il Ge e per il Si. Anche il fosforo di indio (InP) ha una struttura simile a quella del GaAs, così come altri composti del III-V gruppo della tavola periodica.

Il nucleo del silicio contiene 14 protoni ed al suo esterno vi sono altrettanti elettroni, distribuiti su più livelli energetici discreti. Tali **livelli energetici permessi (stati permessi)** sono raggruppati in insiemi di livelli, caratterizzati da energie molto vicine e separati tra loro da un **intervallo proibito (gap proibito) di energia**.

Negli elementi del IV gruppo, come il silicio, gli elettroni di valenza sono meno vincolati al nucleo. Di conseguenza, la distribuzione degli elettroni in un atomo di silicio è la seguente:

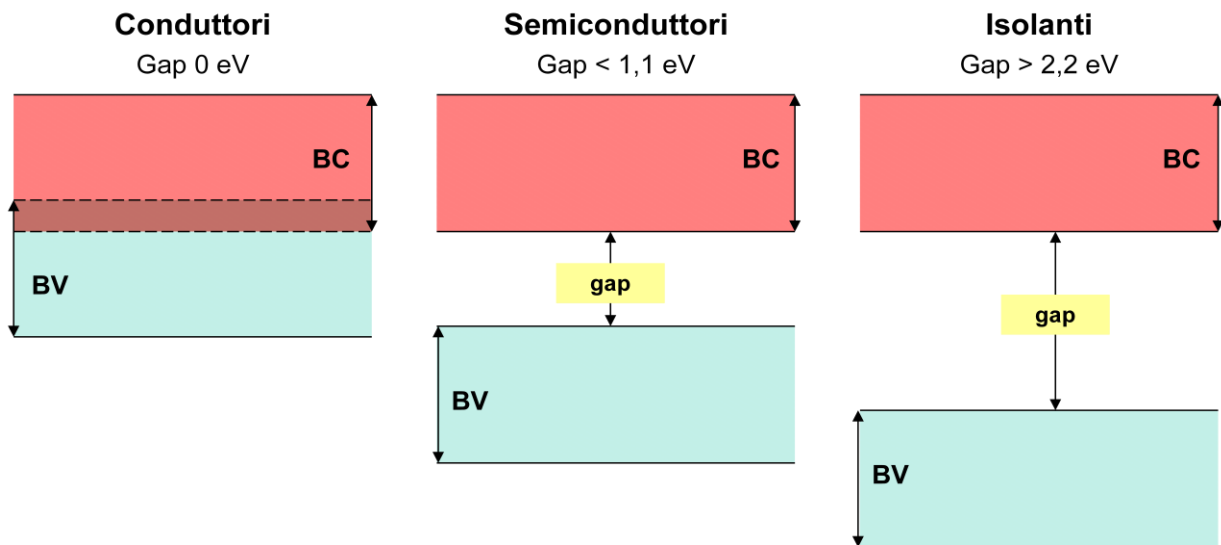


Questa situazione si riferisce a un solo atomo di silicio in assenza di qualunque interazione con il mondo esterno. Ciascun livello di energia è occupato al più da due elettroni per il principio di esclusione di Pauli. Nella figura la distanza in energia tra i livelli adiacenti appartenenti a uno stesso insieme è stata esagerata rispetto all'entità del gap proibito. L'ordine di grandezza dell'intervallo proibito indicato è di 1 eV (1 elettronvolt è l'energia necessaria ad aumentare di un volt il potenziale di un elettrone). Nel caso in cui uno degli elettroni di valenza riesca ad assorbire una quantità di energia pari al gap proibito, esso può superarlo e saltare su un livello energetico permesso appartenente all'insieme immediatamente superiore, laddove è praticamente libero da legami con il nucleo. Quando due atomi di silicio interagiscono tra di loro, i livelli energetici possibili per gli elettroni di valenza non possono essere gli stessi caratteristici dell'atomo isolato, sempre a causa del principio di Pauli. Accade quindi che ciascun livello energetico tipico dell'atomo isolato, si sdoppia in due livelli, vicinissimi tra di loro, per ospitare un numero doppio di elettroni:



Estrapolando questa situazione al caso di  $N$  atomi di silicio (con  $N \sim 10^{23}$  atomi /  $\text{cm}^3$ ) che interagiscono e formano un unico cristallo, ciascuno dei livelli originari relativi al singolo atomo genererà  $N$  livelli energetici possibili

vicinissimi. Come già accennato in precedenza, si avrà in pratica una banda continua di energia permessa corrispondente al numero enorme di livelli energetici estremamente vicini possibili per gli elettroni di valenza, che prende il nome, appunto, di **banda di valenza**. Anche i livelli energetici possibili immediatamente superiori al gap proibito dell'atomo di silicio isolato generano a loro volta un'altra banda continua di livelli permessi, che si chiama **banda di conduzione**, ed è separata dalla banda di valenza da un gap proibito inferiore a 1,1 eV (***E<sub>g</sub>*, Energy gap**).

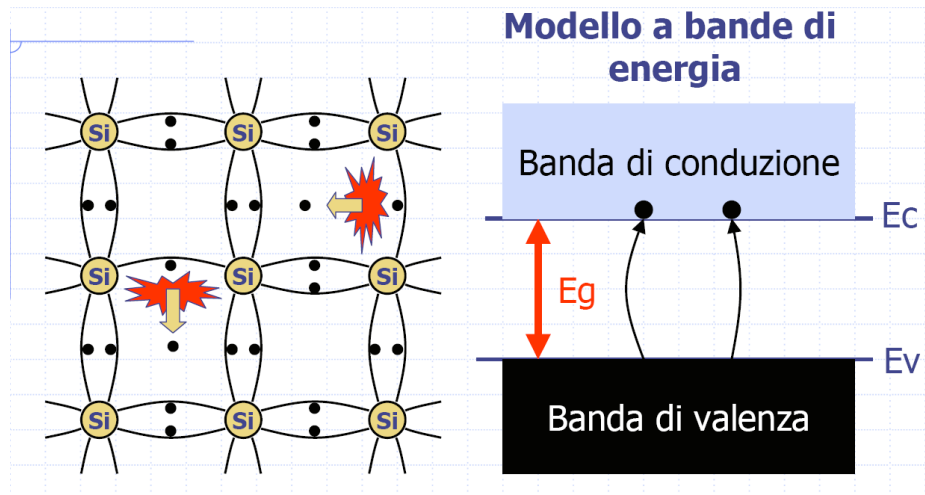


### Elettroni liberi

La configurazione degli atomi, nel cristallo di silicio, non è del tutto stabile. Anche a temperatura ambiente, infatti, a causa dell'incessante vibrazione degli atomi intorno alle loro posizioni di equilibrio (prodotta dall'agitazione termica), alcuni elettroni possono acquistare energia sufficiente per svincolarsi dal complesso di forze che li tengono avvinti al reticolo. La probabilità che ciò avvenga è molto minore per un semiconduttore che non per un metallo: questo spiega la differente resistività.

Per esempio, se per un metallo si può pensare che esista un elettrone libero in corrispondenza di ciascun atomo, nel silicio, a temperatura ambiente, vi sarà un elettrone libero su 3 o 4 milioni di atomi. Se si aumenta però la temperatura, la probabilità che un elettrone periferico possa rompere il proprio legame covalente cresce: ciò spiega perché, nei semiconduttori, la resistività diminuisce con l'aumentare della temperatura.

L'accrescimento del numero di elettroni liberi nel reticolo cristallino di un semiconduttore può avvenire, oltre che per effetto termico, anche per altre cause, come per esempio l'azione dei fotoni oppure l'introduzione di atomi estranei.

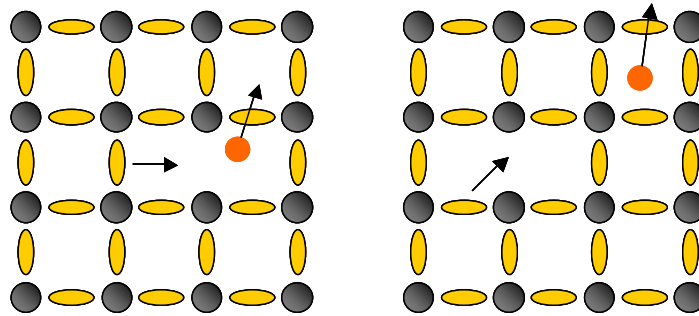


### Lacune

Quando un elettrone A abbandona il legame che lo tiene vincolato al reticolo, nel posto lasciato libero si viene a manifestare un intenso campo elettrico attrattivo per le cariche negative, campo che prima era neutralizzato dalla presenza dell'elettrone.

Questo vuoto, così formato e denominato **lacuna**, potrà essere occupato da un altro elettrone libero oppure, con maggiore probabilità, da un elettrone periferico B di un atomo adiacente, quando l'agitazione termica ne favorisca la cattura. In tal caso, la lacuna si trasferisce nell'atomo che ha perduto l'elettrone B, e si ripete il meccanismo di cattura di un altro elettrone C da un atomo adiacente, e così di seguito.

Ne consegue che la lacuna, inizialmente creata dalla fuoriuscita dell'elettrone A, si sposta all'interno del cristallo in modo del tutto casuale, sotto l'effetto dell'agitazione termica degli atomi.



### Conduzione intrinseca

Sia per gli elettroni sia per le lacune, il movimento nel reticolo cristallino di un semiconduttore è del tutto disordinato e privo di una direzione privilegiata. Se però, mediante una pila, si crea all'interno del cristallo un campo elettrico, tale movimento viene ad assumere il carattere di una migrazione ordinata di elettroni, che si spostano dai punti a potenziale più basso verso quelli a potenziale più alto, e di lacune, che si spostano in senso opposto.

L'esperienza dimostra che, agli effetti elettrici, gli spostamenti ordinati delle lacune equivalgono a un flusso di cariche positive.

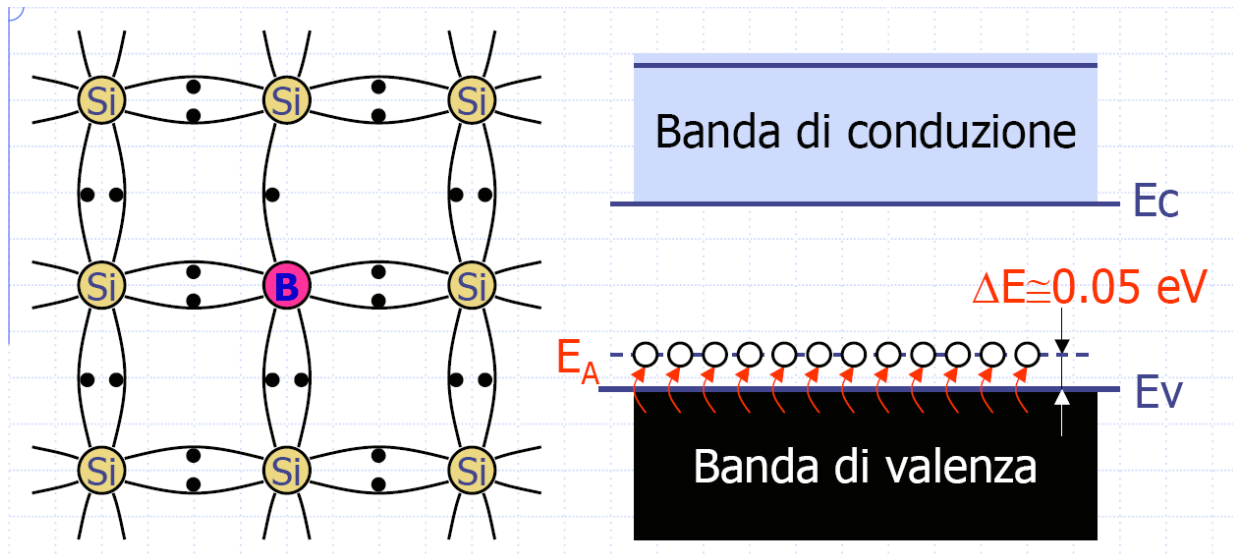
***A differenza dei metalli, dove la conduzione è esclusivamente elettronica, nei semiconduttori la conduzione è dovuta al contributo degli elettroni, portatori di cariche negative, e delle lacune, che sono portatrici di cariche positive.***

## Drogaggio dei semiconduttori

La presenza di quantità, anche minime, di atomi di impurità nel reticolo cristallino del silicio o di un altro semiconduttore accresce in modo notevole la conducibilità.

Per la sua applicazione nella costruzione dei transistor è particolarmente interessante l'effetto prodotto quando l'impurità è costituita da un **elemento pentavalente** (fosforo, antimonio, arsenico), con 5 elettroni nell'ultimo strato, o un **elemento trivalente** (boro, gallio, indio), con 3 elettroni nell'ultimo strato.





Riepilogando, la presenza di atomi pentavalenti dà origine ad altrettanti elettroni liberi, mentre la presenza di atomi trivalenti produce altrettante lacune.

Poiché il numero di elettroni liberi e di lacune generati dalle impurità è di gran lunga maggiore del numero di elettroni liberi e di lacune presenti nel semiconduttore puro per agitazione termica, si comprende come nei semiconduttori drogati (cioè arricchiti di impurità) la resistività risulti molto minore.

Il germanio, ad esempio, a temperatura ordinaria e per diversi livelli di drogaggio, presenta i seguenti valori di resistività:

Resistività del germanio drogato a 20 °C	
Concentrazione atomi tri o pentavalenti	Resistività ( $\rho$ )
0 atomi	$0,5 \cdot 10^6$ ohm·mm <sup>2</sup> /m
1 atomo ogni $250 \cdot 10^6$ atomi di Ge	$0,1 \cdot 10^6$ ohm·mm <sup>2</sup> /m
1 atomo ogni $14 \cdot 10^6$ atomi di Ge	$0,01 \cdot 10^6$ ohm·mm <sup>2</sup> /m
1 atomo ogni 250.000 atomi di Ge	100 ohm·mm <sup>2</sup> /m

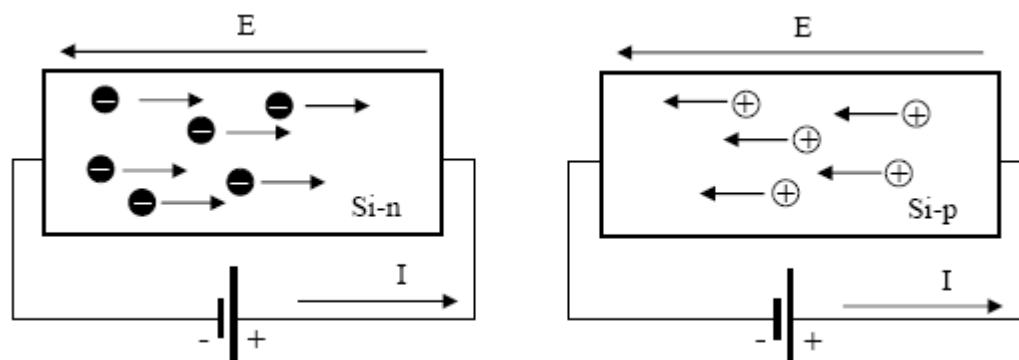
## Semiconduttori di tipo n e di tipo p

I semiconduttori drogati con impurità pentavalente sono definiti di **tipo n** e quelli drogati con impurità trivalente sono chiamati semiconduttori di **tipo p**. I primi sono caratterizzati dal fatto che nel loro reticolo cristallino, oltre alle coppie elettrone-lacuna prodotte dall'agitazione termica, vi sono pure

gli elettroni liberi prodotti dalle impurità, per cui i portatori di elettricità negativa sono prevalenti rispetto ai portatori di elettricità positiva. Nei secondi, invece, prevalgono i portatori di elettricità positiva in quanto, oltre alle coppie elettrone-lacuna del semiconduttore puro, vi sono le lacune generate dagli atomi dell'impurità trivalente.

È importante notare che **tanto i semiconduttori di tipo n quanto quelli di tipo p sono elettricamente neutri**, dal momento che non vi è squilibrio di cariche elettriche: ciò perché la carica positiva, portata dai nuclei, è sempre eguale a quella negativa degli elettroni. Lo squilibrio esiste soltanto rispetto ai portatori di elettricità che contribuiscono alla conduzione. Nei primi sono prevalenti i portatori negativi; nei secondi, i portatori positivi.

In un semiconduttore drogato la corrente di deriva è quindi essenzialmente dovuta ai portatori maggioritari. Ne consegue che, applicando una tensione dall'esterno, la corrente elettrica nel semiconduttore del tipo n è prevalentemente costituita di elettroni, mentre in quello del tipo p è prevalentemente costituita di lacune.



### Giunzione n-p

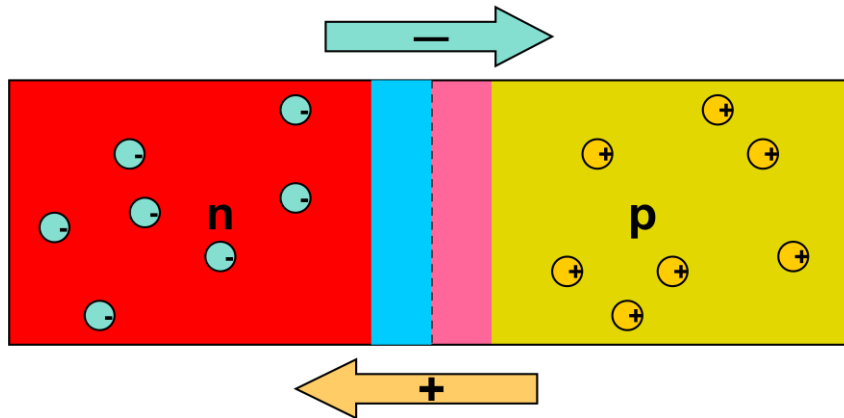
Nei semiconduttori drogati, i portatori di elettricità (siano essi elettroni o lacune) si muovono disordinatamente in seno al reticolo cristallino.

Pertanto, se due cristalli di silicio, uno di tipo n e uno di tipo p, vengono uniti, alcuni elettroni del Si-n, nel corso del loro moto disordinato, diffondono nel Si-p e, viceversa, alcune lacune diffondono dal tipo p nel tipo n. A causa di questa diffusione, dovuta all'agitazione termica, i due cristalli di silicio, che originariamente erano allo stato neutro, acquisiscono una polarità elettrica: il Si-p ne acquista una negativa ed il Si-n ne acquista una positiva.

Il processo di diffusione non interessa tutto il volume dei due cristalli di semiconduttore, ma soltanto una ristretta zona intorno alla giunzione, in quanto esiste un'elevata probabilità che un elettrone, penetrato nel Si-p,



dove abbondano le lacune, si incontri appunto con una lacuna, neutralizzandosi. Lo stesso vale per le lacune che si diffondono nel Si-n, in cui abbondano gli elettroni.



È facile constatare che il processo di carica, dovuto alla diffusione, viene così a creare, nella zona intorno alla giunzione, una barriera di potenziale che si oppone al moto delle cariche attraverso la giunzione stessa. Infatti, il Si-n, che si è caricato positivamente, respinge le lacune che provengono dal Si-p e, viceversa, il Si-p, caricato negativamente, respinge gli elettroni che provengono dal Si-n.

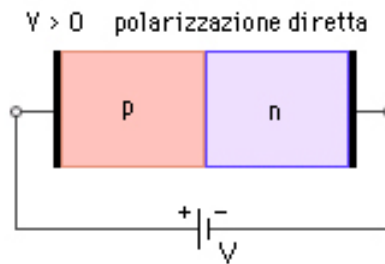
È chiaro quindi che, dopo una fase transitoria di brevissima durata, il processo di diffusione ha termine.

### **Diodo a giunzione**

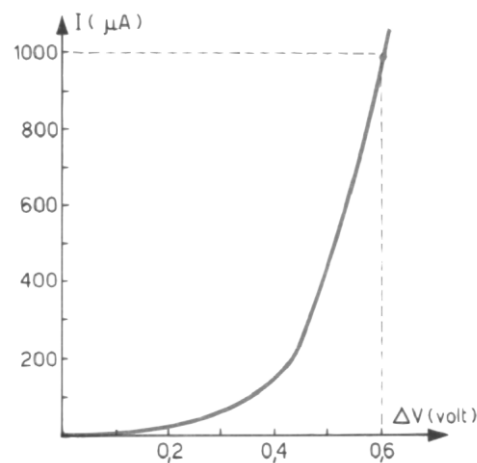
Se con una pila si applica una differenza di potenziale all'estremità dei due cristalli di silicio che formano la giunzione, si riscontra un comportamento elettrico completamente diverso in funzione delle polarità della pila che si applicano:

#### **Polarizzazione diretta**

Si dice che una giunzione è polarizzata direttamente se il semiconduttore di tipo p è collegato con il polo positivo della pila e quello di tipo n con il polo negativo.

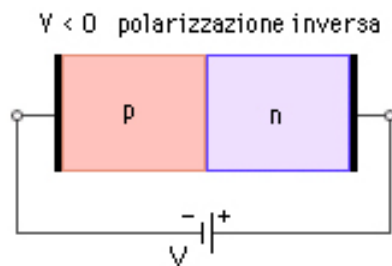


La barriera di potenziale esistente ai capi della zona di diffusione è ridotta o addirittura annullata dal campo esterno, per cui le lacune della zona p non incontrano difficoltà a migrare verso il polo negativo della pila, così come gli elettroni della zona n non incontrano difficoltà a migrare verso il polo positivo. Si ha in tal modo nel circuito esterno una corrente elettrica convenzionale, la cui intensità dipende dal valore della differenza di potenziale applicata dalla pila.



**Polarizzazione inversa**

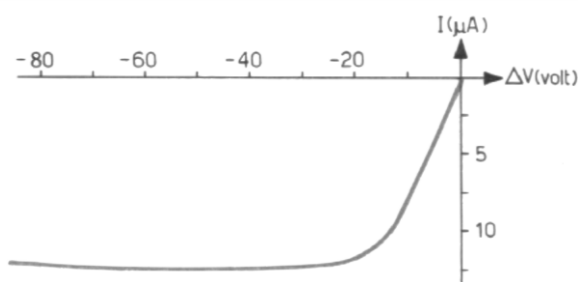
Se il semiconduttore di tipo p è collegato al polo negativo e quello di tipo n è collegato al polo positivo, si dice che la giunzione è polarizzata inversamente.



In tale situazione, la polarizzazione esterna non fa che accrescere la barriera di potenziale e arresta qualsiasi flusso di elettroni dal tipo n al tipo p e di lacune dal tipo p al tipo n.

Bloccati così i portatori di maggioranza, cioè quelli prodotti dal drogaggio, la corrente elettrica è affidata al flusso dei portatori di minoranza, cioè agli elettroni ed alle lacune prodotti dall'agitazione termica che, sollecitati dal campo esterno, danno luogo a una corrente estremamente debole, dell'ordine di 1 o 2  $\mu\text{A}$ .

La corrente inversa si mantiene pressoché costante al variare della differenza di potenziale in quanto bastano pochi volt per esaurire tutte le coppie elettrone-lacuna prodotte dall'agitazione termica. Per aumentare tali coppie e quindi l'intensità della corrente inversa, è necessario aumentare la temperatura.



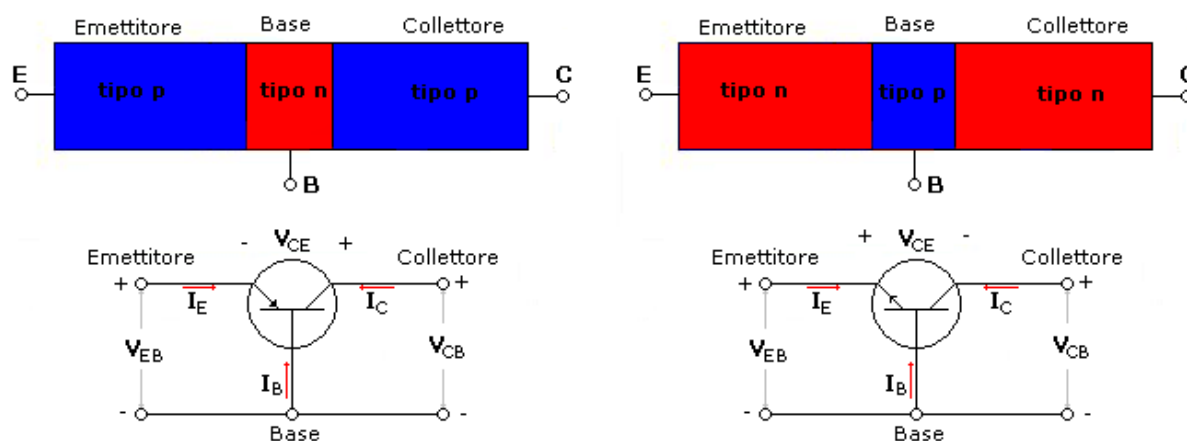
Il diodo a giunzione si comporta come un conduttore unidirezionale, cioè come un conduttore che ha una resistenza piccola se viene polarizzato direttamente e una resistenza molto grande se viene polarizzato inversamente.

## Transistor bipolare a giunzione

Il **transistor (transformer resistor, trasformatore di resistenza)** si può considerare come un conduttore, la cui resistenza può essere fatta variare entro determinati limiti.

Le tre zone del transistor bipolare a giunzione sono chiamate **emettitore, base e collettore**. L'emettitore e il collettore individuano le due zone del cristallo con lo stesso tipo di drogante mentre la base corrisponde alla parte del cristallo di diverso drogaggio che si trova tra le prime due. A prima vista il transistor appare come un dispositivo simmetrico in cui è possibile scambiare collettore ed emettitore senza alterare le proprietà fisiche della giunzione. Questo in genere non è vero in quanto spesso l'emettitore e il collettore hanno caratteristiche differenti (livello di drogaggio, dimensioni, ecc.).

È chiaro che vi possono essere due tipi di transistor bipolare a giunzione: il **tipo n-p-n** e il **tipo p-n-p**. In entrambi i casi la giunzione emettitore-base deve essere polarizzata direttamente con una differenza di potenziale di qualche decimo di volt, mentre la giunzione base-collettore va polarizzata inversamente mediante una differenza di potenziale di qualche volt.



Transistor bipolare a giunzione tipo p-n-p e n-p-n con rappresentazione circuitale.

Per comprendere il comportamento elettrico del transistor, è necessario tenere presente che il semiconduttore che funge da emettitore ha una concentrazione di atomi di impurità assai più elevata di quella con cui è drogata la base. Se nella base, per esempio, è presente 1 atomo di impurità ogni  $1 \cdot 10^6$  atomi di silicio, nell'emettitore vi sarà 1 atomo di impurità ogni 100.000 atomi di silicio.

Questo fatto comporta una conseguenza di notevole importanza. Si consideri, per esempio, il transistor n-p-n: la giunzione emettitore-base, che è polarizzata direttamente, sarà attraversata da un flusso di elettroni

dall'emettitore verso la base, e da un flusso di lacune in senso inverso. Poiché il drogaggio delle due parti non è uniforme, il numero di elettroni nel senso emettitore-base sarà però decisamente superiore al numero di lacune che si muovono in senso opposto. Si verifica così un processo di iniezione di elettroni dall'emettitore alla base, la cui entità dipende dalla differenza di potenziale stabilita dal generatore, in quanto è con tale tensione che si riduce la barriera di potenziale della giunzione emettitore-base.

