

Livelli e Bande di Energia

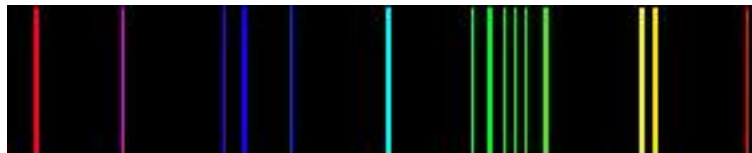
Energia posseduta dagli elettroni

Come abbiamo visto nella lezione “ I vari modelli dell’atomo “ secondo una modellizzazione meccanica si riteneva che un elettrone potesse possedere un’energia che variava con continuità, assumere cioè qualunque valore reale possibile. All’aumentare dell’energia posseduta l’elettrone percorreva orbite con raggio sempre più grande fino a potersi allontanare dall’atomo

Questo modello non era però in grado di spiegare i risultati che si ottenevano analizzando lo spettro di emissione degli atomi cioè le frequenze delle radiazioni emesse dagli atomi. In una radiazione la frequenza è legata all’energia posseduta dalla radiazione emessa. Se un elettrone poteva variare la propria energia di un valore qualunque poteva emettere dunque radiazioni a tutte le frequenze

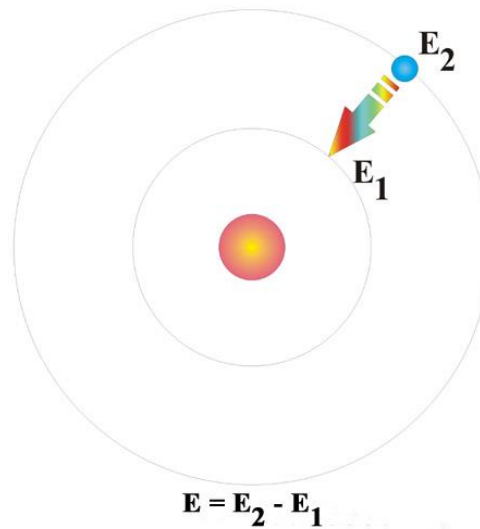


mentre si notava sperimentalmente che venivano emesse radiazioni soltanto ad alcune frequenze



Il fisico Niels Bohr ne dedusse che l’energia posseduta dall’atomo dovesse essere allora una grandezza quantizzata, una grandezza cioè che non poteva assumere tutti i valori possibili, ma che variasse a scatti, detti quanti di energia. Di conseguenza anche le orbite percorse non potevano essere tutte quelle immaginabili ma il loro raggio doveva variare a scatti, di multipli di una quantità minima.

Un elettrone poteva passare da un’orbita all’altra soltanto cedendo o acquistando una quantità di energia pari alla differenza fra le energie corrispondenti alla due orbite.

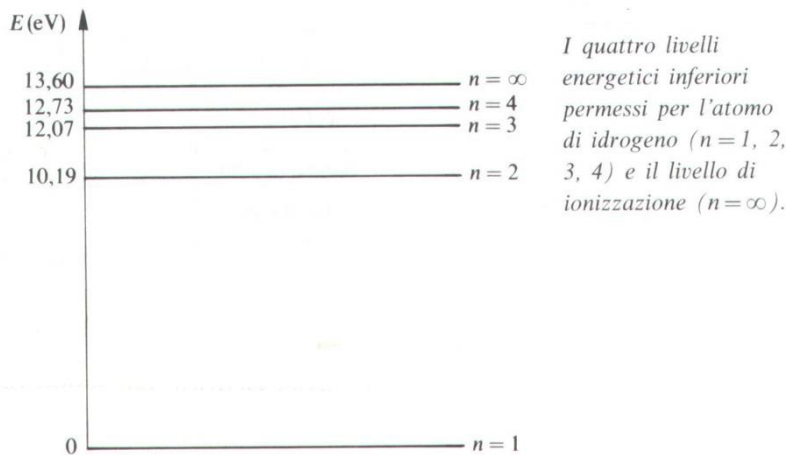
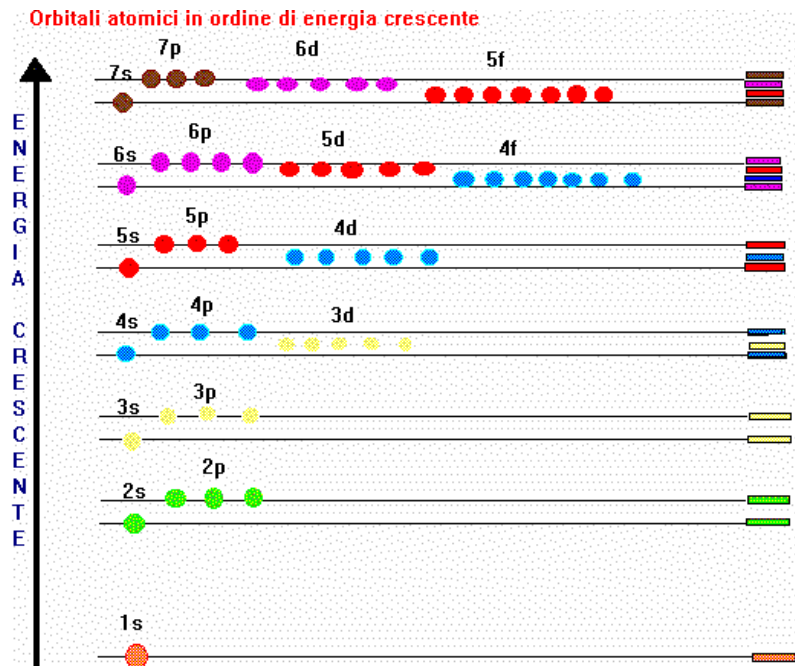


Il modello di Bohr resse a lungo sia pur con correzioni di dettaglio come quella di De Broglie, che consentivano una maggiore aderenza ai risultati sperimentali.

La vera rivoluzione fu data dal principio di indeterminazione di Heisenberg, che dimostrò in sostanza che non è possibile determinare contemporaneamente posizione e velocità di un elettrone nello spazio. Da ciò deriva che parlare di orbite percorse dall'elettrone è un non senso., perché il concetto di orbita presuppone la capacità di determinare con precisione il moto di un corpo. Andava introdotto, allora, un nuovo modello di interpretazione degli atomi, in cui si rinunciava a determinare con precisione assoluta il moto degli elettroni e ci si accontentava di darne una descrizione probabilistica: invece di determinarne la traiettoria ci si accontentava di determinare zone dello spazio intorno al nucleo in cui l'elettrone potrebbe trovarsi con sufficiente probabilità, gli orbitali. Questi orbitali venivano determinati mediante strumenti matematici molto sofisticati, detti funzione d'onda

Livelli e bande di energia

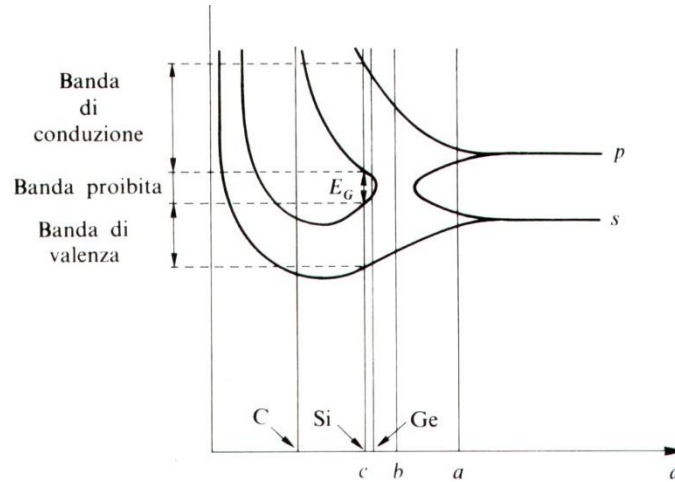
Quello che ci interessa ora ribadire è la natura quantizzata dell'energia posseduta da un elettrone



Ad un elettrone sono dunque permessi soltanto certi livelli di energia, ad esempio 10,19 elettronvolt oppure 12,047 elettronvolt ma non, per esempio, 10,21 oppure 11,4589 elettronvolt. Dunque la sua energia non può assumere tutti i valori immaginabili.

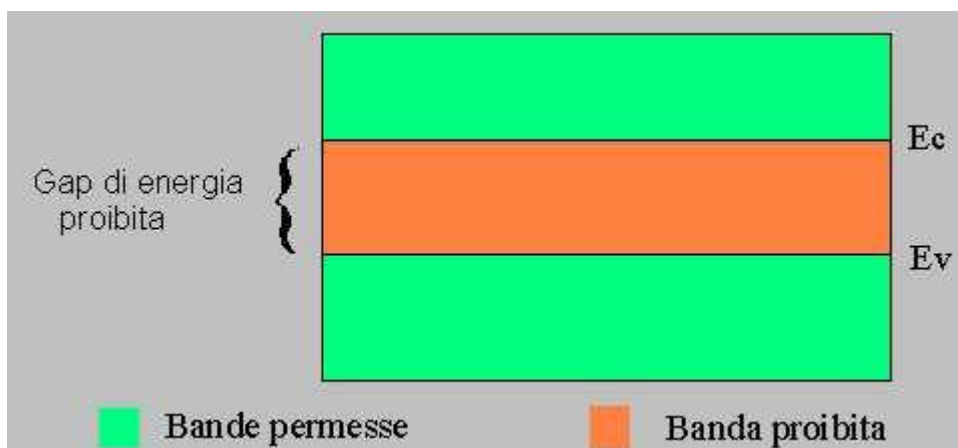
Questa situazione è vera, però, soltanto se l'atomo è isolato, molto distante dagli altri atomi. Se l'atomo è inserito in un reticolo cristallino, le interazioni elettriche fra gli elettroni di un atomo e

quelli dell'atomo successivo complicano le cose e fanno moltiplicare i livelli energetici possibili. Analizziamo la seguente figura



In essa poniamo sull'asse delle ascisse la distanza d interatomica cioè la distanza reciproca fra i vari nuclei del reticolo, e sull'asse delle ordinate l'energia posseduta dagli elettroni. Vediamo che se d è molto grande, cioè gli atomi sono molto distanti l'uno dall'altro, vi sono pochi livelli energetici, ma via via che avviciniamo gli atomi fra loro, i livelli si moltiplicano tanto da dar luogo a vere e proprie bande, cioè intervalli all'interno dei quali è permesso all'energia di assumere un qualsiasi valore.

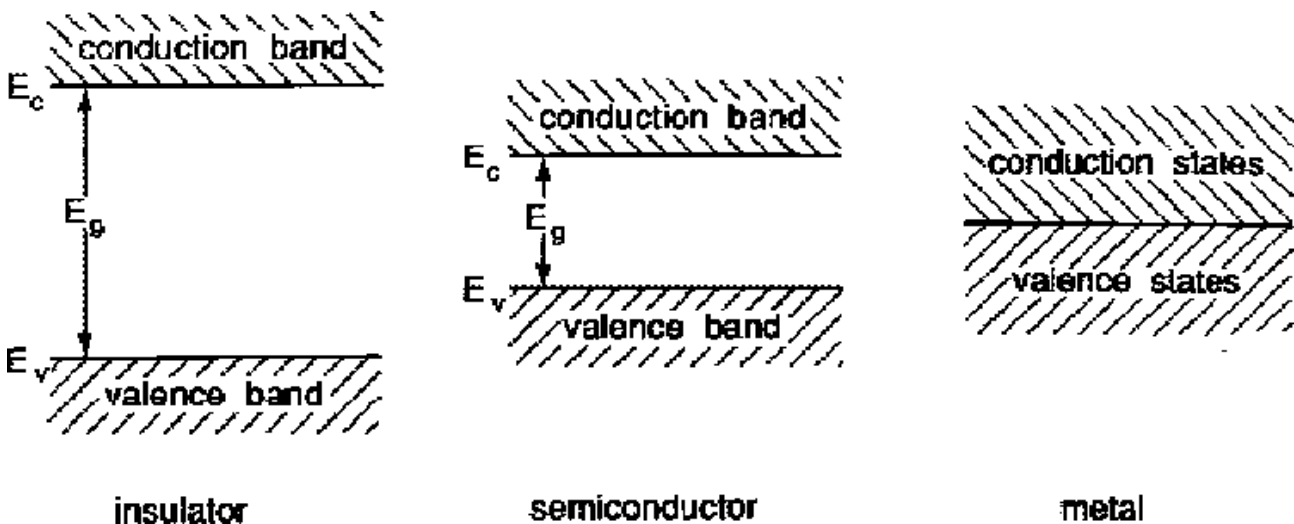
Dalla figura si vede anche che si creano bande di valori di energia che un elettrone non può possedere. In definitiva, per atomi inseriti in un reticolo cristallino, la situazione è la seguente



Abbiamo tre possibili bande di energia:

- **la banda di valenza**, è un insieme di valori di energia che possiede un elettrone vincolato all'atomo,
- **la banda proibita o gap** costituita da un insieme di valori di energia che un elettrone non può possedere
- **la banda di conduzione**. Un elettrone che acquista una tale energia abbandona l'atomo e diventa libero.

Scopriamo anche, dalla figura precedente, che l'ampiezza della banda proibita dipende dalla distanza interatomica e che essa è molto grande negli isolanti, ha un valore minore nei semiconduttori, è praticamente inesistente nei conduttori



Proprio l'ampiezza della banda proibita consente di spiegare il diverso comportamento di isolanti, conduttori e semiconduttori.

Negli isolanti, data l'ampiezza del gap, diventa molto difficile, improbabile statisticamente, che un elettrone diventi libero, per cui la popolazione di elettroni liberi in un materiale isolante è molto piccola, da cui l'impossibilità di avere correnti significative.

Nei semiconduttori, il numero di elettroni liberi è superiore a quello presente negli isolanti poiché il gap da saltare è inferiore.

I conduttori sono ricchissimi di elettroni liberi poiché non esiste una banda proibita da dover superare.



<http://www.marrazzoantonio.altervista.org>

Per avere un'idea più precisa, diciamo che in un metro cubo di materiale isolante troverete da 1 milione a dieci milioni di elettroni liberi mentre in un buon conduttore troverete 10^{28} elettroni liberi cioè 10 miliardi di miliardi di miliardi di elettroni liberi.

Nel silicio abbiamo 10^{16} elettroni liberi per metro cubo cioè dieci milioni di miliardi di elettroni liberi.

Conduttori, semiconduttori ed isolanti

Possiamo classificare i materiali presenti in natura in base alla conducibilità elettrica che mostrano e quindi all'ostacolo che offrono al passaggio della corrente. Sappiamo che gli isolanti non consentono il passaggio di correnti apprezzabili, i conduttori consentono il passaggio di corrente e i semiconduttori hanno caratteristiche intermedie fra le altre due categorie.

Per esser più precisi dobbiamo introdurre il concetto di resistività, per resistività si intende con esattezza la resistenza offerta al passaggio della corrente, misurata fra facce opposte di un cubo il cui volume sia proprio un centimetro cubo: l'unità di misura della resistività è Ωcm . Nella seguente tabella riportiamo l'ordine di grandezza della resistività per isolanti, conduttori e semiconduttori.

	Resistività (Ωcm)
Isolanti	10^{10} - 10^{23}
Semiconduttori	10^3 - 10^8
Conduttori	10^{-8} - 10^{-4}

Tavola delle resistività di alcuni materiali

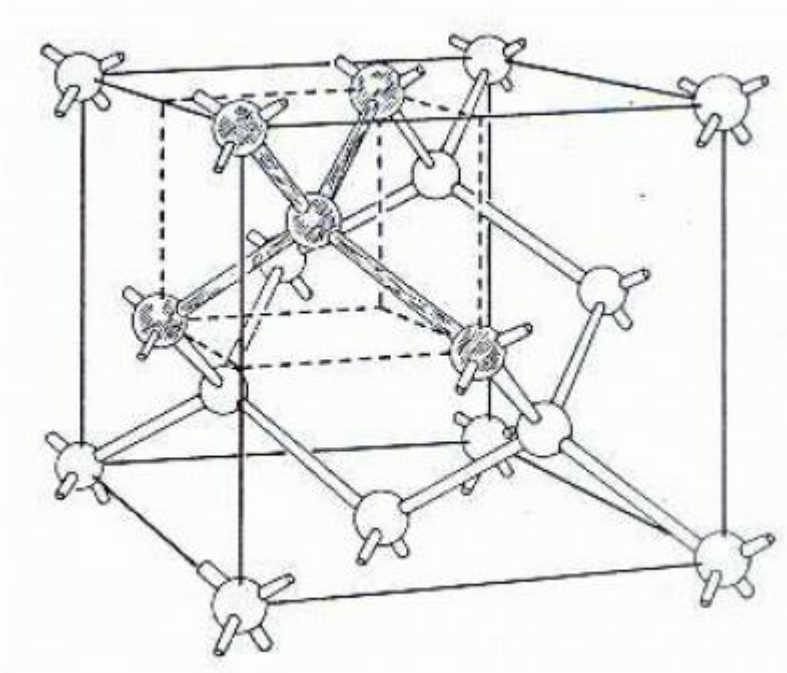
(calcolati a 20 °C)

Materiale	Resistività r (in $\Omega \times \text{mm}^2 / \text{m}$)
Argento	0.016
rame	0.017
Oro	0.024
Alluminio	0.028
Tungsteno	0.055
Platino	0.10
Ferro	0.13
Acciaio	0.18
Piombo	0.22
Mercurio	0.94
Costantina (lega 80% Cu, 40% Ni)	0.49
Carbonio	35
Germanio	60×10^2
Silicio	2.3×10^9
Ambra	5×10^{20}
Vetro	$10^{16} \div 10^{20}$
Mica	$10^{17} \div 10^{21}$
Zolfo	10^{21}
Legno secco	$10^{14} \div 10^{17}$

I semiconduttori

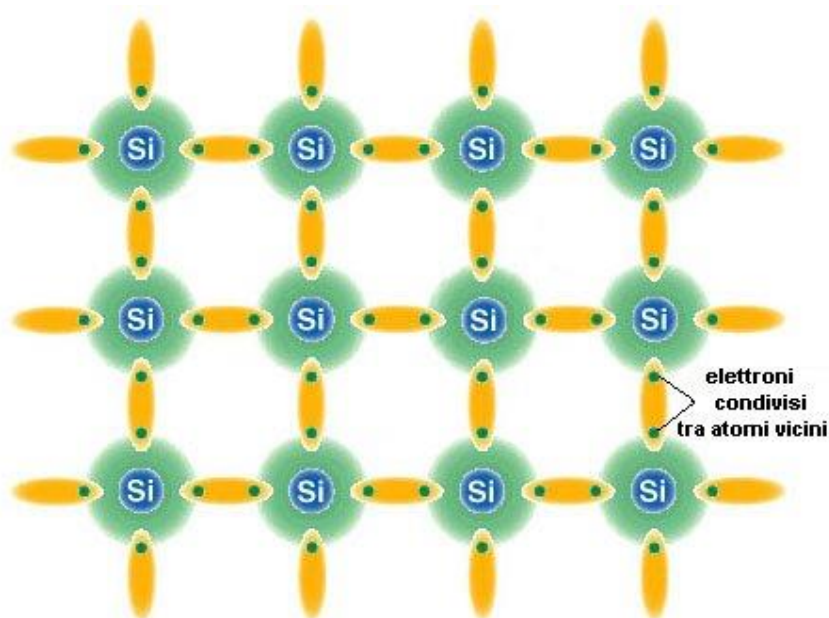
I semiconduttori naturali usati per la produzione di dispositivi elettronici sono stati per molti anni il silicio e il germanio. Il germanio è andato, con il passar del tempo, in disuso a causa delle migliori prestazioni del silicio. Ora si stanno diffondendo semiconduttori costituiti non da elementi naturali ma da leghe come l'arseniuro di gallio.

Il silicio e il germanio appartengono al gruppo del carbonio e sono tetraivalenti, sono quindi in grado di formare quattro legami covalenti



In un reticolo cristallino ogni atomo di silicio è dunque legato ad altri quattro atomi.

Senza perdere in efficacia precisione possiamo immaginarci un modello del reticolo bidimensionale

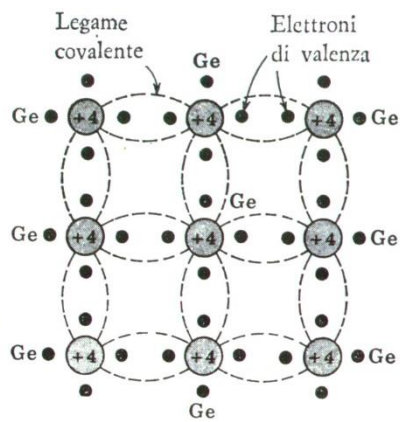


Le lacune

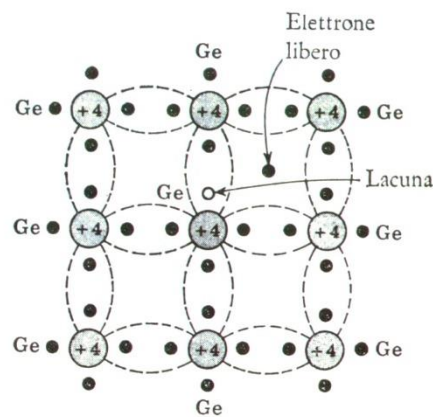
La prima cosa che bisogna comprendere è che in un semiconduttore, a differenza dei conduttori, esistono due tipi di cariche libere: cariche libere negative costituite dagli elettroni e cariche libere

positive dette lacune. Premettiamo fin da subito che le lacune, intese come cariche positive, non esistono ma costituiscono soltanto un modello molto efficace per rappresentare il comportamento dei semiconduttori.

Immaginiamo che un elettrone di valenza, coinvolto in un legame fra due atomi di silicio, acquisisca l'energia sufficiente per effettuare il salto dalla banda di valenza alla banda di conduzione. L'elettrone andrà ad arricchire la popolazione di elettroni liberi mentre l'orbitale da cui proveniva presenterà un vuoto. Tale vuoto è quello che noi chiamiamo lacuna.

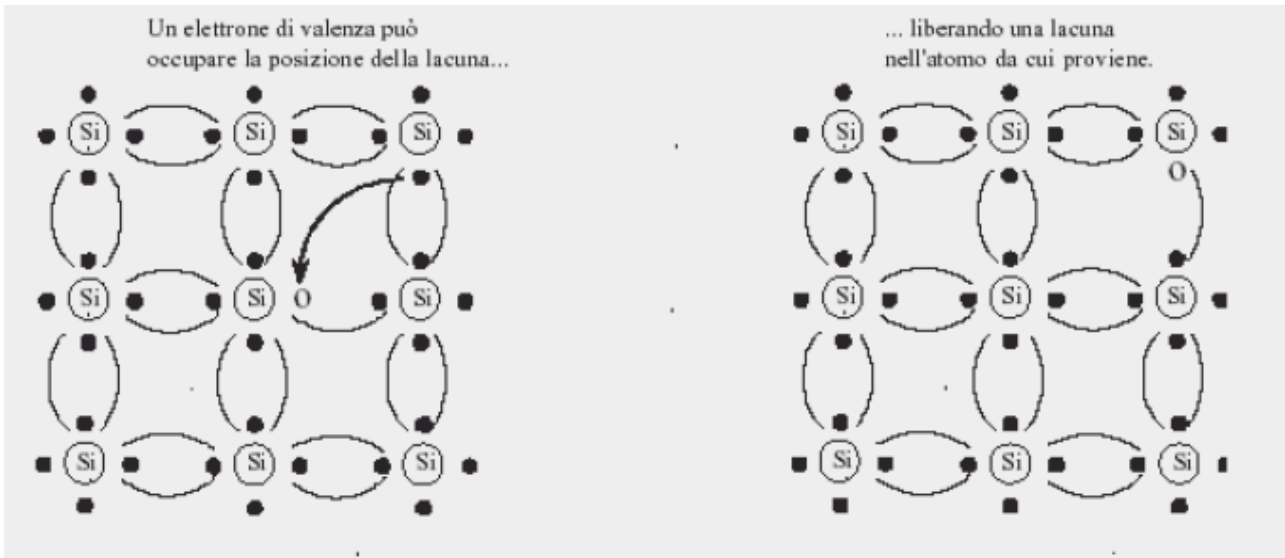


- Rappresentazione simbolica in due dimensioni della struttura cristallina del Ge.



Cristallo di Ge con un legame covalente rotto.

Ora accade che l'energia necessaria perché un elettrone vincolato in un legame vicino balzi nel legame semivuoto andando così ad occupare la lacuna, è molto bassa. Quindi l'effettuazione di questo salto avverrà con elevata probabilità. Se si riflette un attimo si nota come l'evento possa essere descritto dicendo che sia stata la lacuna a spostarsi in direzione opposta a quella del moto dell'elettrone.



Modelli raffinati di fisica hanno dimostrato che effettivamente si può descrivere efficacemente la fisica dei semiconduttori immaginando di avere a che fare con cariche positive libere di muoversi all'interno del reticolo cristallino. Ricordando che le lacune non sono reali cariche positive, da questo momento in poi, per la sola ragione che abbiamo un modello efficace per descrivere il comportamento dei dispositivi a semiconduttore, parleremo sempre di correnti di lacune e correnti di elettroni.

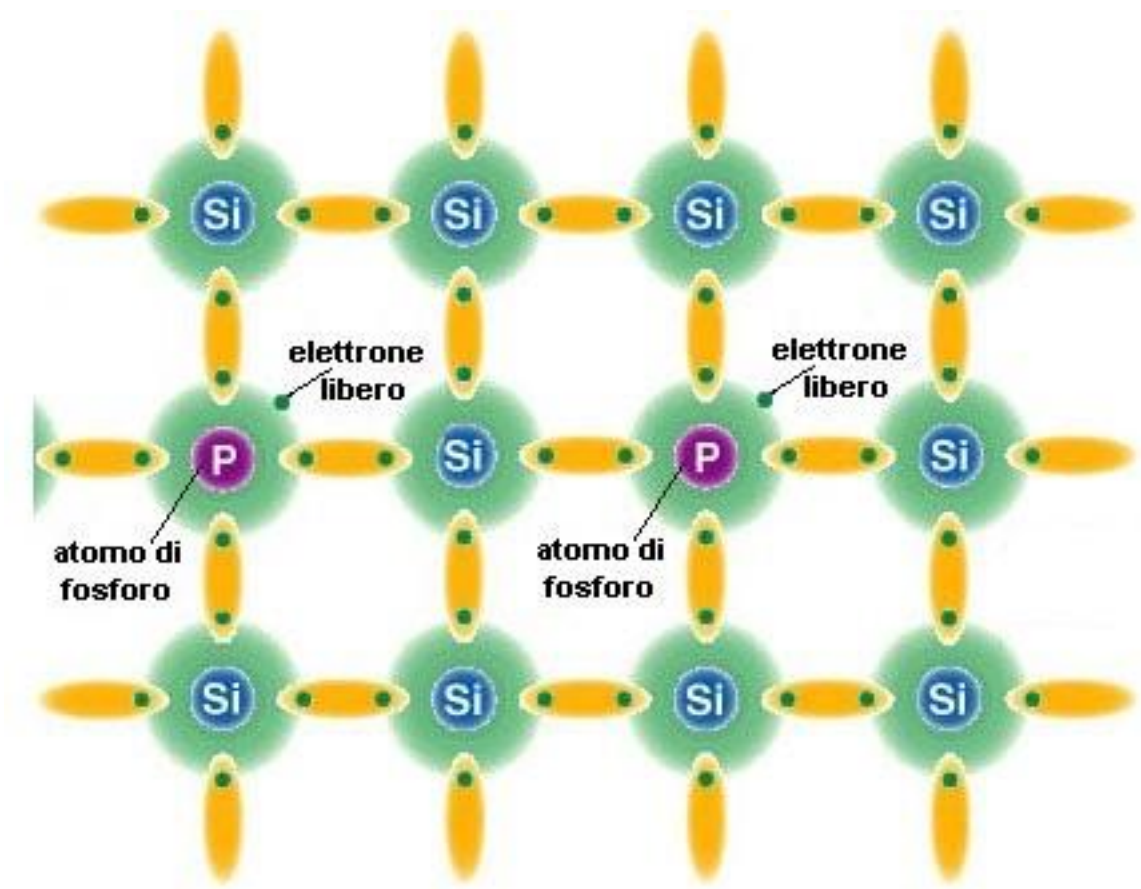
Drogaggio dei semiconduttori

I semiconduttori offrono una resistività troppo elevata per poter essere utilizzati come base dei dispositivi elettronici. Pur avendo un numero di cariche libere superiore a quello degli isolanti, questo non è ancora sufficiente.

Per aumentare il numero di portatori di carica liberi e diminuire quindi la resistività si utilizza un procedimento, detto drogaggio, consistente nell'inserire, all'interno del reticolo cristallino del semiconduttore, elementi chimici diversi. Esistono due forme di drogaggio: tipo n e tipo p.

Drogaggio di tipo n

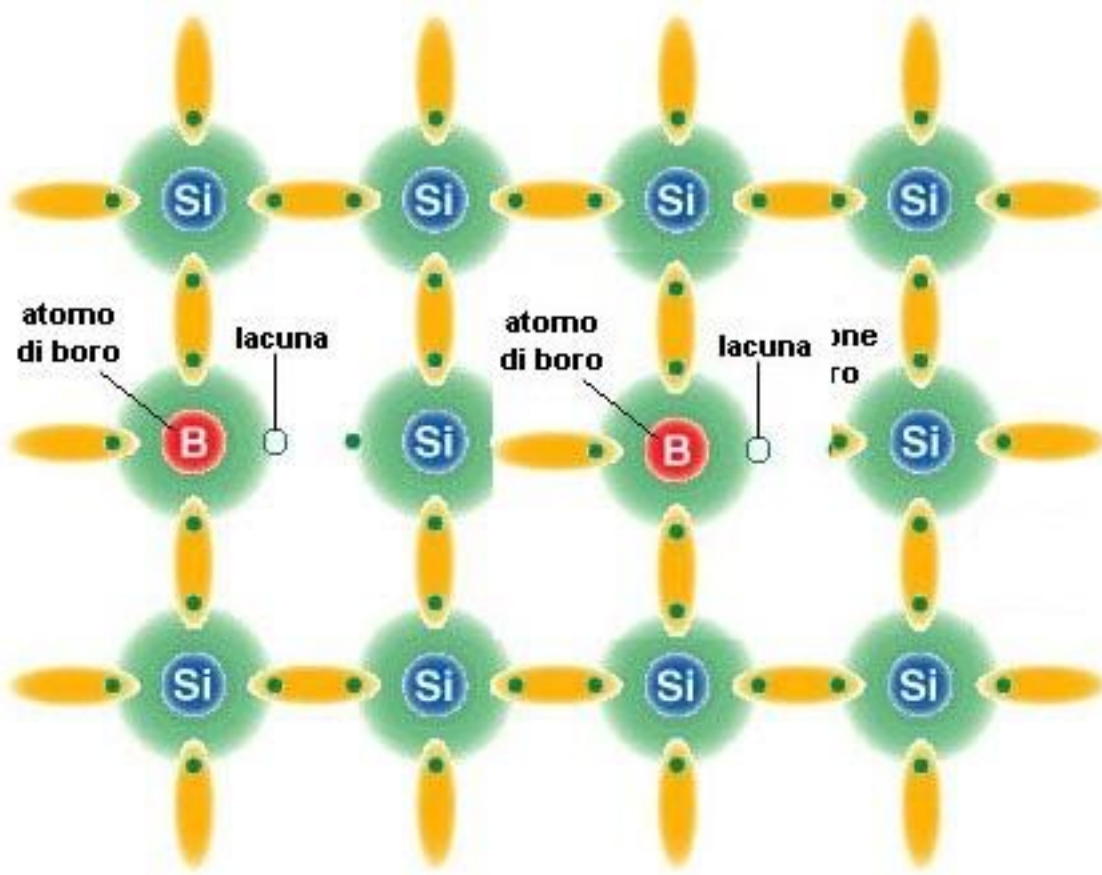
Con questo tipo di drogaggio ci si pone l'obiettivo di aumentare il numero di elettroni liberi. Si realizza inserendo nel reticolo cristallino del semiconduttore materiale drogante pentavalente (cinque elettroni di valenza) come il fosforo.



IL fosforo è in grado di formare cinque legami differenti, ma a causa della struttura del reticolo cristallino, esso risulta circondato da soli quattro atomi di silicio. Poiché il quinto legame non si può formare, l'elettrone superfluo, non essendo coinvolto in un orbitale di legame, abbisogna di una piccola quantità di energia per diventare libero. In pratica, per ogni atomo di fosforo che introduciamo nel reticolo del semiconduttore si introduce un elettrone libero.

Drogaggio di tipo p

Con questo tipo di drogaggio aumentiamo il numero di lacune. Si introducono nel reticolo atomi di materiale trivalente come il Boro.



Poiché il boro può realizzare tre legami soltanto, pur essendo circondato da quattro atomi di silicio, si realizza automaticamente una lacuna.