

## SEMICONDUTTORI

La conduttività del rame, che è un buon conduttore, è circa  $6 \cdot 10^7 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$  mentre il quarzo, che è un buon isolante, ha una conduttività dell'ordine di  $10^{-18} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ . Questo significa che la corrente che fluisce attraverso un cubetto di rame, sotto una determinata tensione, è -1026 volte circa maggiore della corrente che attraversa un ugual cubetto di quarzo sotto le stesse condizioni.

Esistono diversi materiali che hanno valori di conducibilità intermedi tra i due valori estremi, relativi ai buoni conduttori e ai buoni isolanti; questi materiali con caratteristiche intermedie vengono denominati *semiconduttori*.

I semiconduttori più usati nella tecnica elettronica sono il *silicio* e il *germanio*.

I solidi, che sono formati da un grandissimo numero di atomi, possiedono degli insiemi di livelli energetici, detti anche bande di energia. Si ha la *banda di valenza*, alla quale appartengono tutti gli elettroni presenti nell'orbita più esterna degli atomi e la *banda di conduzione*, alla quale appartengono tutti gli elettroni in possesso di un'energia che permette loro di sfuggire all'attrazione del nucleo, diventando così elettroni liberi. Tra le bande ammesse esiste uno spazio vuoto (gap) detto anche *banda di energia proibita* nel senso che in essa non possono esserci elettroni. In figura 1 è riportata qualitativamente la situazione nei tre casi di isolante, semiconduttore e conduttore.

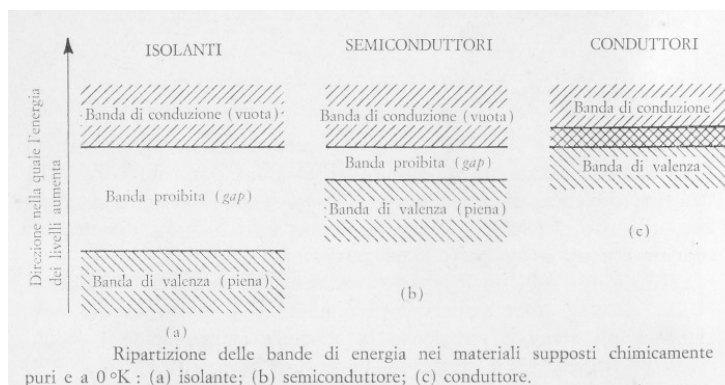


Fig.1

### Isolanti

La banda di valenza è completamente piena, mentre quella di conduzione è completamente vuota; la banda proibita, che le separa, è molto ampia. Gli elettroni di valenza non sono in grado di saltare l'ostacolo della banda proibita e di trasferirsi nella banda di conduzione, che è, come già detto, vuota. Gli elettroni in questo cristallo sono legati saldamente al reticolo e sotto l'azione di un normale campo elettrico non danno luogo ad alcuna corrente elettronica.

### Semiconduttori

La banda di valenza è completamente piena di elettroni e dista poco dalla banda di conduzione. In questo caso è relativamente facile pervenire a condizioni di conducibilità. Infatti già a temperatura ambiente alcuni elettroni, a causa dell'energia termica che ricevono dall'esterno, riescono a portarsi nella banda di conduzione.

### Conduttori

Una parte della banda di valenza si sovrappone con quella di conduzione. In questo caso gli elettroni non devono attraversare alcuna banda proibita; la conduttività, al contrario di quanto accade per i semiconduttori, aumenta al diminuire della temperatura.

### Germanio e silicio

Il germanio e il silicio sono i due semiconduttori più importanti usati nella fabbricazione dei dispositivi elettronici a stato solido. La struttura cristallina di questi materiali consiste in una ripetizione regolare, nelle tre direzioni dello spazio, di una cella a forma di tetraedro regolare con un atomo per ciascun vertice.

Nella sua struttura atomica il silicio possiede 14 elettroni, mentre il germanio ne possiede 32; entrambi sono tetravalenti, cioè presentano solo 4 elettroni nell'orbita più esterna. La fig.2 mostra la struttura in una rappresentazione semplificata in due dimensioni. I collegamenti a tratteggio fra i vari atomi rappresentano i legami covalenti, mentre i cerchi in grigio rappresentano gli atomi di germanio con l'esclusione dei 4 elettroni di valenza; ciò che resta di ciascun atomo di germanio ha quindi una carica positiva pari a  $+4e$ , dove  $e$  è la carica dell'elettrone.

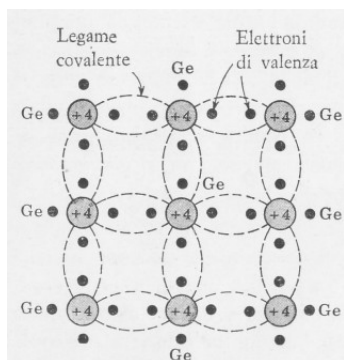


Fig.2 Rappresentazione simbolica in due dimensioni della struttura cristallina del germanio

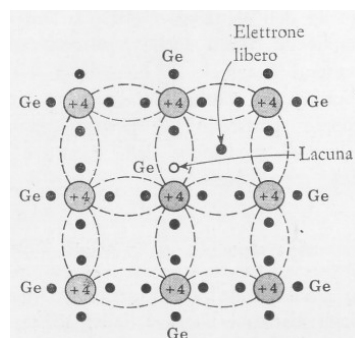


Fig.3 Cristallo di germanio con un legame covalente rotto

A temperature estremamente basse (intorno a 0 °K) ci si avvicina alla struttura ideale di fig. 2 e il cristallo si comporta come un isolante poiché non vi sono portatori di carica liberi e quindi disponibili per la conduzione di corrente. Alla temperatura ambiente (300 °K), tuttavia, alcuni legami covalenti, a causa dell'agitazione termica, vengono rotti ed è possibile avere conduzione attraverso il cristallo. La fig. 3 illustra la situazione; in essa si è supposto un solo legame rotto.

Alla rottura di un legame covalente si forma nel cristallo un elettrone libero ed una carica positiva, detta *lacuna*, nel posto occupato dall'elettrone prima della rottura. La lacuna costituisce un portatore di carica analogamente all'elettrone libero ed entrambi contribuiscono alla conduzione elettrica attraverso il cristallo.

Nei semiconduttori si hanno quindi due tipi di portatori : gli elettroni e le lacune; quest' ultime equivalgono ai fini della conduzione elettrica a delle effettive cariche positive libere, di valore uguale a quella dell' elettrone (+e). In un semiconduttore esente da qualsiasi impurezza, detto anche *semiconduttore intrinseco*, il numero di lacune presenti è uguale al numero di elettroni liberi. L'agitazione termica produce in continuazione nuove coppie elettrone-lacuna, mentre altre coppie spariscono per ricombinazione. In condizioni di equilibrio, il ritmo di produzione delle coppie è uguale al ritmo di ricombinazione delle coppie stesse.

### Semiconduttori drogati

Aggiungendo al germanio (o al silicio) puro una piccola quantità d' impurezza pentavalente, alcuni atomi di germanio nel reticolo cristallino vengono sostituiti dagli atomi d'impurezza (fig. 4). Quattro dei cinque elettroni dell'atomo pentavalente formano i legami covalenti con i quattro atomi circostanti di germanio, mentre il quinto elettrone è libero e quindi disponibile come portatore di corrente.

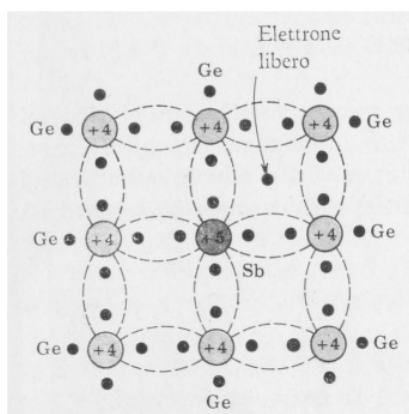


Fig.4 Struttura cristallina con un atomo di germanio sostituito da un atomo di impurezza pentavalente

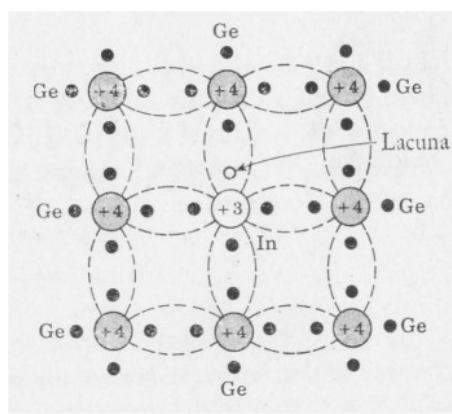


Fig.5 struttura cristallina con un atomo di germanio sostituito da un atomo di impurezza trivalente

Il processo mediante il quale si aggiungono impurezze ad un semi conduttore puro è conosciuto come *drogaggio* (doping) del semiconduttore.

L'arsenico, il fosforo e l'antimonio sono le impurezze pentavalenti più comunemente usate; esse vengono denominate impurezze donatrici in quanto forniscono al semiconduttore elettroni liberi. L'atomo pentavalente donatore, dopo aver ceduto al cristallo l' elettrone libero, rimane immobilizzato nel reticolo cristallino come ione positivo e non partecipa alla conduzione elettrica.

Il drogaggio di un semiconduttore con impurezze donatrici fa aumentare in esso il numero degli elettroni liberi; diminuisce invece il numero delle lacune al di sotto del valore che si ha nel semiconduttore intrinseco

La conducibilità del semiconduttore drogato è denominata conducibilità estrinseca ed il suo inverso resistività estrinseca. Con impurezze pentavalenti (i cui atomi hanno cioè cinque elettroni nell'orbita più esterna), la conducibilità è dovuta essenzialmente agli elettroni ed il semiconduttore si dice di tipo N.

Aggiungendo al semiconduttore intrinseco un' impurezza trivalente (elemento con tre soli elettroni nell'orbita più esterna), quali il boro, l' indio, il gallio e l' alluminio, soltanto tre dei quattro legami covalenti possono essere formati con i quattro atomi di germanio (o di Silicio) circostanti ed il vuoto che rimane nel quarto legame costituisce una lacuna; la fig. 5 illustra questo stato di cose.

Poiché le impurezze trivalenti forniscono al cristallo cariche positive (lacune) disponibili come portatori, esse vengono chiamate *impurezze accettrici*, in quanto, creando lacune, possono accettare elettroni di valenza dagli atomi circostanti.

L' atomo accettore, dopo aver catturato un elettrone, rimane immobilizzato nel reticolo cristallino come ione negativo e non partecipa alla conduzione elettrica attraverso il cristallo. Nel semiconduttore drogato con impurezze trivalenti, aumenta il numero di lacune presenti, mentre quello degli elettroni liberi diminuisce al di sotto del valore che si ha nel semiconduttore intrinseco, dato che il maggior numero di lacune fa aumentare il ritmo di ricombinazione.

La conducibilità del semiconduttore drogato con impurezze trivalenti è dovuta essenzialmente alle lacune ed esso si dice di tipo P. Minime tracce di impurezze alterano notevolmente la conducibilità del semiconduttore; ad esempio l' aggiunta di un atomo donatore per ogni  $10^8$  atomi di germanio, fa aumentare la conducibilità, a 30 °C, di un fattore pari a 12.

Le lacune e gli elettroni dovuti rispettivamente al drogaggio di tipo P e a quello di tipo N, si dicono anche portatori di maggioranza, che con i portatori di minoranza, di origine termica, costituiscono le cariche mobili, in grado di conferire ai semiconduttori una discreta conducibilità.

Si tenga infine ben presente che nei semiconduttori sia di tipo P che di tipo N, il materiale rimane elettricamente neutro in quanto la somma algebrica delle cariche positive e negative è sempre nulla.

### Giunzione P-N

Consideriamo due pezzi di semiconduttore di germanio, uno drogato di tipo P e uno drogato di tipo N; portandoli a contatto lungo una superficie si ottiene una *giunzione*.

In effetti la formazione di una giunzione implica processi tecnologici abbastanza complessi, con i quali si deve mantenere attraverso la giunzione la continuità della struttura cristallina (reticolo) del materiale semiconduttore usato.

I due pezzi di semiconduttore si presentano inizialmente neutri; infatti nel germanio di tipo P ci sono tante lacune quanti sono gli atomi accettori e ugualmente nel germanio di tipo N ci sono tanti elettroni liberi quanti sono gli atomi donatori, non tenendo conto delle coppie elettrone - lacuna di origine termica. La situazione è illustrata in fig.6, dove sono rappresentate schematicamente le cariche fisse (ioni) con un cerchietto recante all'interno un + (donatori) o un - (accettori), mentre le cariche mobili sono indicate semplicemente con un + (lacune) e con un - (elettroni).

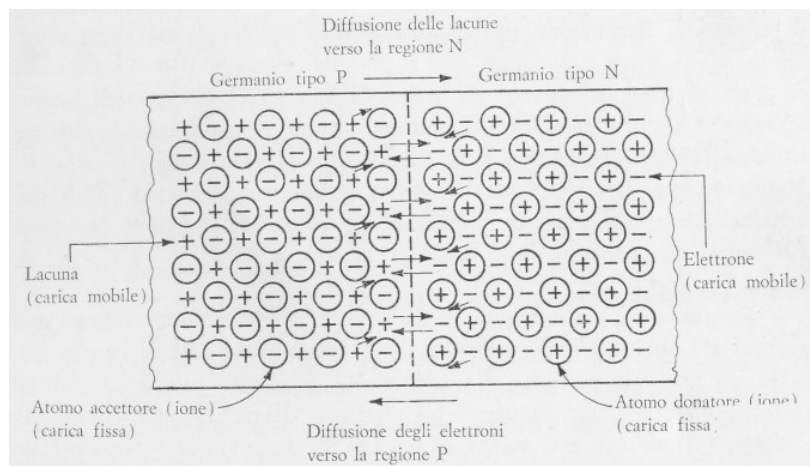


Fig.6 – Rappresentazione di una giunzione PN all'atto della sua formazione; le frecce in corrispondenza della giunzione indicano la direzione dello spostamento delle cariche mobili (elettroni e lacune)

Non appena si forma la giunzione, nella regione immediatamente adiacente ad essa si ha una diffusione spontanea di elettroni dal semiconduttore di tipo N verso il semiconduttore di tipo P e di lacune in senso inverso; in pratica gli elettroni e le lacune che si trovano nella zona della giunzione si eliminano gli uni con le altre, nel senso che gli elettroni neutralizzano le lacune.

Una volta avvenuto, sempre nella regione immediatamente adiacente alla superficie di separazione dei due pezzi di semiconduttore di diverso tipo, il passaggio di cariche mobili nei due sensi opposti, i due pezzi di materiale non sono più elettricamente neutri. Infatti il semiconduttore di tipo P che ha perduto delle lacune, assume una netta carica negativa, mentre il semiconduttore di tipo N che ha perduto degli elettroni, assume una netta carica positiva (fig. 7).

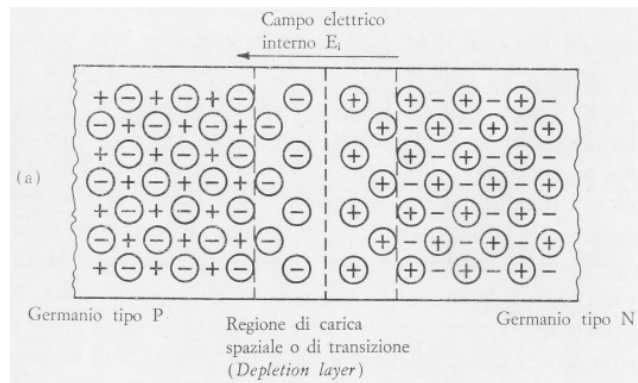


Fig.7 – situazione delle cariche di una giunzione dopo la diffusione delle cariche mobili:

La zona compresa tra i tratteggi è detta zona di svuotamento, o di transizione. Ei rappresenta il campo elettrico dovuto alla distribuzione di cariche positive e negative nella regione di transizione (o Depletion layer).

#### Giunzione PN sottoposta a un campo elettrico esterno.

La giunzione PN, dopo la diffusione delle cariche mobili nella regione immediatamente adiacente ad essa, resta nelle condizioni rappresentate in fig.7.

La distribuzione non uniforme di cariche, donatori ed accettori, dà luogo ad un campo elettrico  $E_i$  che si oppone al passaggio degli elettroni liberi verso il semiconduttore di tipo P e delle lacune verso il semiconduttore di tipo N.

Si applichi ora una d.d.p., ad esempio mediante una batteria, collegata con le polarità indicate in fig. 8 e cioè con il polo negativo, dalla parte del semiconduttore di tipo N.

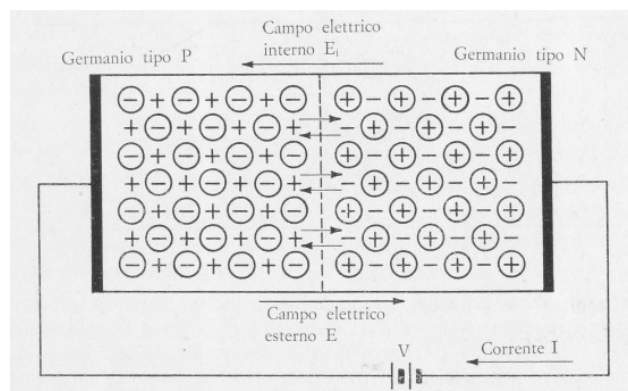


Fig.8 – Giunzione polarizzata direttamente

La giunzione viene così sottoposta ad un campo elettrico esterno  $E$  di senso opposto ad  $E_i$ ; il campo elettrico  $E$  ripristina ed agevola la diffusione delle cariche attraverso la giunzione per cui gli elettroni riprendono a passare dalla regione N alla regione P e analogamente le lacune vanno dalla regione P verso la regione N.

Si stabilisce quindi una corrente, all'interno del semiconduttore e nel circuito esterno, di intensità  $I$ , dipendente dal valore della tensione esterna applicata.

La giunzione è stata polarizzata in senso diretto cioè in modo tale da permettere il passaggio della corrente. La presenza della tensione esterna  $V$  ha abbassato la barriera di potenziale, che si opponeva al passaggio della corrente.

In maniera più intuitiva si può spiegare il passaggio della corrente, quando si applica una d.d.p. esterna  $V$  con le polarità segnate sempre in fig. 8 col fatto che gli elettroni della regione N, che venivano respinti dalla distribuzione di cariche fisse negative (donatori), localizzate nella zona di transizione lato P, ora vengono attratte e sollecitate ad attraversare la giunzione dalla polarità positiva della batteria. Analogamente le lacune che venivano respinte dalla distribuzione di cariche fisse positive (accettori), localizzate nella zona di transizione lato N, ora vengono attratte e portate ad attraversare la giunzione dalla polarità negativa della batteria.

### Giunzione non conduttrice

Si invertano ora le polarità della batteria; in questo caso il campo elettrico esterno  $E$  ha lo stesso senso del campo interno  $E_i$ , che quindi viene rinforzato fig.9

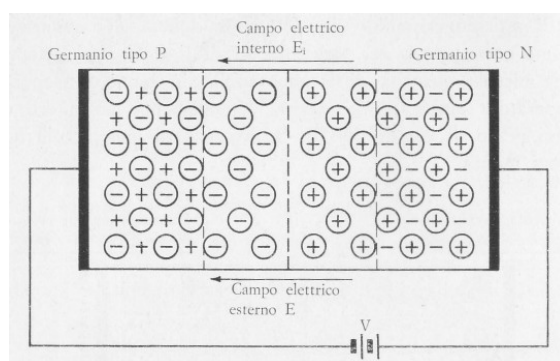


Fig.9

In tal modo gli elettroni liberi della regione N non possono in queste condizioni diffondersi verso la regione P e allo stesso modo le lacune della regione P non possono diffondersi verso la regione N.

Il risultato è che la giunzione non conduce; si dice che la giunzione è polarizzata in senso inverso; cioè in modo tale da non permettere la conduzione di corrente. La barriera di potenziale si è innalzata e la zona di transizione si è allargata.

In maniera intuitiva si può pure spiegare l'impossibilità delle cariche libere a superare la giunzione.

Infatti gli elettroni della regione N, che venivano respinti dalla distribuzione di cariche fisse negative (accettori), localizzate nella zona di transizione lato P, ora trovano un ulteriore ostacolo costituito dall'effetto di repulsione dovuto al polo negativo della batteria collegato al semiconduttore tipo P. Con lo stesso ragionamento le lacune che venivano respinte dalla distribuzione di cariche fisse positive (donatori), localizzate nella zona di transizione lato N, ora trovano anch'esse un ulteriore ostacolo dovuto alla repulsione causata dal polo positivo della batteria, collegato al semiconduttore tipo N (fig. 9).

### Corrente inversa in una giunzione.

In realtà però anche quando una giunzione è polarizzata inversamente, nel circuito scorre una debolissima corrente. Nelle figure precedenti sono stati rappresentati solo gli elettroni e le lacune liberi dovuti agli atomi di impurità. Non è stato tenuto conto nel ragionamento precedente delle lacune e degli elettroni provenienti dalla rottura dei legami covalenti degli atomi che formano il reticolo cristallino del semiconduttore, dovuta alla agitazione termica.

Come conseguenza nel pezzo di semiconduttore di tipo N, sarà sempre presente una piccola quantità di lacune mobili, in numero proporzionale alla temperatura ambiente. Lo stesso ragionamento porta ad ammettere in un pezzo di semiconduttore di tipo P, la presenza di una piccola quantità di elettroni mobili.

La debole corrente inversa che scorre nel circuito quando la giunzione è polarizzata inversamente è dovuta proprio a queste cariche mobili, elettroni liberi nel semiconduttore tipo P e lacune libere nel semiconduttore tipo N, di origine termica, detti portatori di minoranza.

Il campo elettrico esterno  $E$  permette ad alcuni elettroni liberi della regione P di passare nel semiconduttore N e ad alcune lacune libere della regione N di passare nel semiconduttore P.

Poiché il numero di queste cariche cresce con la temperatura, la corrente inversa risulta dipendere da quest'ultima.