

RIPASSIAMO LE BASI DELL'ELETTROTECNICA

L'articolo offre un quadro completo ed aggiornato delle leggi che regolano l'elettrotecnica, leggi che anche un tecnico pratico, quale può essere un installatore, non può esimersi dal conoscere per svolgere razionalmente il proprio lavoro.

Parte quattordici: SEMICONDUTTORI

A cura della Redazione

14.1 - Generalità

I semiconduttori sono materiali che in alcune condizioni si comportano praticamente come isolanti e in altre come conduttori. In particolare la loro capacità di conduzione può essere controllata per via elettrica.

Vi sono semiconduttori naturali, come il germanio e il silicio e semiconduttori artificiali come l'arseniuro di gallio.

Nel Capitolo 1 si è proceduto ad una classificazione dei materiali per uso elettrica suddividendoli in tre grandi categorie: conduttori, isolanti e semiconduttori.

Successivamente sono state discusse le proprietà e le applicazioni dei materiali appartenenti alle prime due categorie. In questo capitolo vengono ora trattati i semiconduttori, cioè quei materiali che in determinate condizioni si comportano da conduttori e in altre da isolanti.

Il primo impiego di un materiale semiconduttore (il cristallo di galena) si ebbe all'inizio di questo secolo negli apparecchi radoriceventi per la rivelazione dei segnali: radio.

Tuttavia solo con l'invenzione del transistor, avvenuta nel 1948, i semiconduttori hanno trovato impieghi sempre più numerosi ed ora si può dire costituiscono il materiale base per la realizzazione di ogni componente elettronico attivo.

L'importanza dei semiconduttori è dovuta principalmente a due motivi:

- questi materiali posseggono un numero di cariche elettriche nella banda di conduzione relativamente modesta per cui è abbastanza semplice il controllo del loro movimento per via elettrica;

— la quantità di cariche elettriche della banda di conduzione può essere modificati per via chimica iniettando all'interno di questi materiali opportune sostanze trivalenti o pentavalenti (drogaggio).

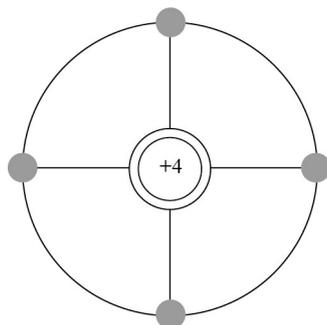


Figura 14.1 - Schematizzazione di un atomo di germanio o di silicio.

I semiconduttori di tipo naturale, come il germanio e il silicio, sono quelli di gran lunga più usati nella tecnologia dei componenti elettronici per cui, nel seguito, si farà riferimento solo alle caratteristiche di questi semiconduttori.

Si ricorda che trova importanti applicazioni anche l'arseniuro di gallio che è un semiconduttore ottenuto per via chimica.

14.2 - Struttura cristallina

Il germanio e il silicio appartengono al IV gruppo della tavola degli elementi naturali per cui hanno valenza quattro.

Hanno molecole di forma tetraedrica e gli atomi sono uniti tra loro da un legame covalente cioè attraverso il mutuo scambio di un elettrone.

Il germanio (*Ge*) e il silicio (*Si*) sono elementi che presentano entrambi quattro elettroni nell'orbita più esterna (Figura 14.1); questi elettroni, detti di valenza, sono quelli di maggior interesse perché dal loro comportamento dipendono le principali caratteristiche elettriche dei materiali semiconduttori.

Gli elettroni di valenza sono quelli che un atomo di una sostanza è in grado di stare o di ricevere in prestito nella combinazione con un altro atomo.

Il germanio e il silicio presentano la stessa struttura cristallina, con molecole di forma tetraedrica, nella quale ogni atomo è equidistante dagli altri quattro più vicini (Figura 14.2): ciò dipende dal fatto che, in questi elementi, ciascun elettrone di valenza accoppia con un elettrone di uno dei quattro atomi confinanti (questo tipo di legame dice covalente).

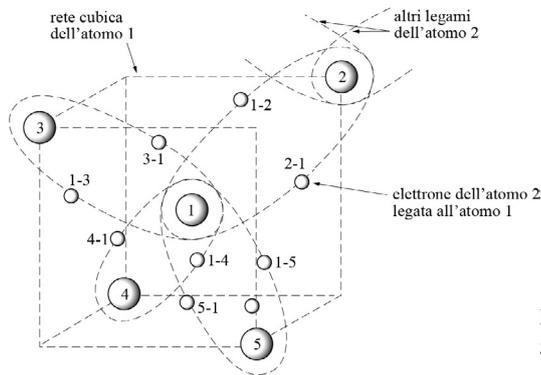


Figura 14.2 - Struttura di una molecola di germanio o di silicio.

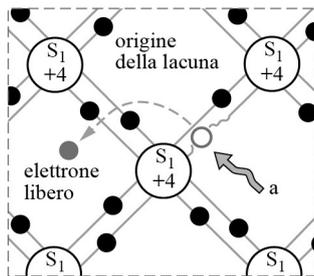


Figura 14.3 - Generazione di una coppia elettrone libero-lacuna. Un effetto energetico (termico o luminoso) determina la rottura del legame covalente.

Fornendo a un semiconduttore energia sotto forma termica o luminosa, si può provocare la rottura dei legami covalenti con la conseguente formazione di elettroni liberi (cariche negative) e di lacune (cariche positive).

Il moto di queste cariche e quindi la capacità di conduzione del semiconduttore, può essere controllato applicando al medesimo una appropriata differenza di potenziale.

Il legame covalente dei materiali semiconduttori è un vincolo relativamente labile che può essere rotto facilmente fornendo agli atomi una quantità, anche minima di energia dall'esterno.

Con la rottura del legame, gli elettroni di valenza riescono a superare la banda interdotta (si ricorda che per i semiconduttori tale banda è piuttosto stretta; circa 1,1 eV, per il germanio e circa 0,75 eV, per il silicio) e a passare in quella di conduzione.

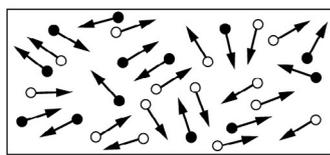
Il fenomeno può essere provocato facilmente riscaldando cristalli di materiale puro per cui, già alla temperatura ambiente di 25° C, sono presenti nei semiconduttori elettroni liberi in grado di contribuire alla formazione di una corrente elettrica.

Lo stesso risultato può anche essere a volte conseguito sottoponendo il semiconduttore ad un flusso luminoso.

Si osservi che quando un elettrone abbandona il suo atomo di origine, lascia dietro di sé un vuoto, cioè un legame covalente incompleto, detto lacuna (Figura 14.3).

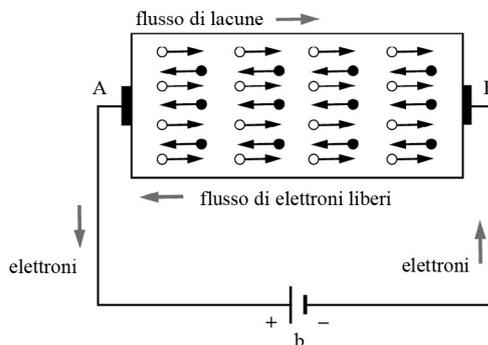
La lacuna costituisce, di fatto, uno ione positivo in quanto la carica (+ 4) del nucleo dell'atomo è maggiore di quella (—3) dei tre restanti elettroni di valenza.

Le lacune non possono lasciare la loro posizione all'interno dei cristalli, tuttavia esse contribuiscono alla conduzione della corrente nel materiale semiconduttore.



a

Figura 14.4 - Moto di elettroni e di lacune in un cristallo:
a - non alimentato;
b - alimentato con generatore di corrente continua.



Infatti, sotto l'azione di un campo elettrico, esse vengono colmate da elettroni che hanno lasciato altri atomi adiacenti (a causa della rottura del legame covalente) i quali determinano in tal modo altre lacune e così di seguito, con un effetto complessivamente assimilabile ad un movimento delle medesime.

Se si applica una tensione ad un semiconduttore contenente elettroni liberi e lacune, i primi si muoveranno dall'elettrodo negativo verso quello positivo, le altre dal positivo al negativo (conduzione intrinseca): al moto disordinato di elettroni e lacune aveva in assenza di tensione, si sostituisce un loro moto ordinato (Figura 14.4).

È opportuno ricordare che il comportamento dei semiconduttori nelle applicazioni pratiche varia notevolmente con la temperatura per ragioni legate a quanto detto sopra in merito alla rottura dei legami covalenti. Questo fatto costituisce uno dei principali svantaggi dei semiconduttori.

14.3 - Semiconduttori drogati (o estrinseci)

Un semiconduttore estrinseco (o drogato) è un cristallo nel quale sono state iniettate alcune sostanze (impurità) al fine di rendere prevalente la conduzione di elettroni liberi o di lacune.

Nelle applicazioni correnti vengono utilizzati semiconduttori cui sono state aggiunte, tecniche speciali, certe impurità al fine di rendere predominante la conduzione di elettroni liberi oppure quella di lacune.

L'aggiunta volontaria di impurità viene chiamata drogaggio e tale operazione si attua iniettando in un cristallo puro (intrinseco) delle quantità ben precise di sostanze trivalenti e pentavalenti dette anche impurità di tipo *p* e rispettivamente di tipo *n*.

Dopo l'aggiunta di impurità il semiconduttore viene definito estrinseco.

Si osservi che sebbene i materiali droganti siano chiamati impurità, essi sono un espediente fondamentale del prodotto finale e perciò devono essere a loro volta assai puri.

Semiconduttori di tipo p

Semiconduttori drogati con sostanze trivalenti si dicono di tipo p e sono caratterizzati dalla presenza di un eccesso di lacune (cariche maggioritarie) rispetto agli elettroni liberi (cariche minoritarie).

Le sostanze trivalenti normalmente usate per le operazioni di drogaggio sono il boro, il gallio e l'indio (impurità di tipo p).

Con la suddetta operazione gli atomi dei droganti vanno a sostituire nel reticolo istallino altrettanti atomi del semiconduttore (Figura 14.5), ma poiché ciascun atomo possiede solo tre elettroni di valenza, riesce a saturare solo tre legami lasciandone uno libero: il drogaggio ha quindi l'effetto di formare nelle strutture cristalline un eccesso di lacune rispetto ai numero di elettroni liberi.

Queste lacune, pur restando fisse all'interno delle impurità, si rendono disponibili per stabilire dei legami con elettroni mobili mantenuti in movimento da un campo elettrico applicato al cristallo agevolando, di fatto, la conduzione.

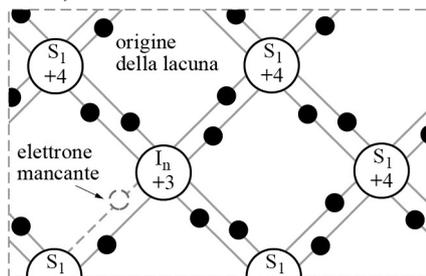


Figura 14.5 - Drogaggio di un semiconduttore mediante impurità trivalenti.

I cristalli drogati con sostanze trivalenti si dicono di tipo p , la sostanza drogante accettore, le lacune che in essa si formano cariche maggioritarie mentre gli elettroni liberi che sotto normalmente presenti nel semiconduttore sono chiamati cari minoritarie.

Semiconduttori di tipo n

Semiconduttori drogati con sostanze pentavalenti si dicono di tipo n e sono caratterizzati dalla presenza di un eccesso di elettroni liberi (cariche maggioritarie) rispetto alle lacune (cariche minoritarie).

Gli atomi delle impurità di tipo n (antimonio, arsenico, fosforo) possiedono 5 elettroni di valenza, uno in più del necessario per completare i 4 legami covalenti (Figura 14.6). Il quinto elettrone può quindi abbandonare facilmente l'atomo di origine rendersi disponibile per la conduzione. Ne deriva che in un semiconduttore drogato con impurità pentavalenti è presente un eccesso di elettroni liberi rispetto alle lacune per cui la conduzione che in esso si può stabilire è dovuta principalmente a elettro liberati dal drogante.

Le impurità di tipo n sono chiamate donatori, gli elettroni da esse liberati cariche maggioritarie, le lacune presenti nel semiconduttore sono dette cariche minoritarie mentre il cristallo drogato viene definito di tipo n .

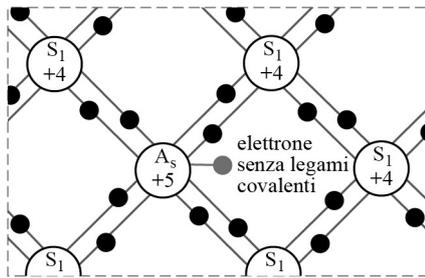


Figura 14.6 - Drogaggio di un semiconduttore mediante impurità pentavalenti.

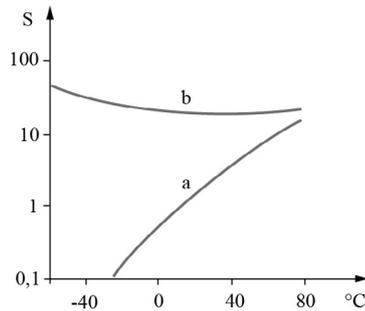


Figura 14.7 - Andamento della conducibilità del germanio in funzione della temperatura:
a - debole drogaggio;
b - forte drogaggio.

Conducibilità

La quantità di impurità che in genere è presente dopo il drogaggio nei semiconduttori intrinseci (puri) è relativamente bassa, $10^{14} \div 10^{18}$ atomi per centimetro cubo di materiale da drogare e non ne altera le proprietà di base.

L'effetto più vistoso provocato dal drogaggio consiste in un notevole aumento de conducibilità del cristallo, tanto più elevato quanto maggiori sono le cariche apportate dal donatore o dall'accettore (cariche maggioritarie). In questo caso la conducibilità è meno dipendente dalla temperatura di quanto avviene invece nel caso dei semiconduttori intrinseci (Figura 14.7).

Ad esempio, raggiunta al germanio di una parte di impurità su 10^8 parti di materiale puro fa diminuire la resistività di quest'ultimo da 0,7 a 0,01 $\Omega \cdot m$ (la conducibilità aumenta quindi di 70 volte).

14.4 - Giunzione pn

Una giunzione pn è costituita da un cristallo semiconduttore comprendente due regioni affacciate: una drogata con sostanze trivalenti e l'altra drogata con sostanze pentavalenti.

In una giunzione pn si distinguono una zona di tipo p (con prevalenza di lacune), una zona di tipo n (con prevalenza di elettroni liberi) e una zona di svuotamento (con assenza di lacune e di elettroni liberi).

I semiconduttori, siano essi di tipo intrinseco o estrinseco, si presentano ad un osservatore esterno, nonostante i fenomeni elettronici interni illustrati nei paragrafi precedenti, come elettricamente neutri.

Questa condizione esteriore si conserva anche nel caso in cui una parte di semiconduttore intrinseco venga drogata con impurità di tipo *n* e un'altra parte con impurità *p* (Figura 14.8). Questo tipo di drogaggio crea però una zona, detta giunzione dalle caratteristiche elettriche particolari e di notevole importanza. In questa zona avvengono, infatti, fenomeni elettronici che, controllati in modo

appropriato, costituiscono la chiave del funzionamento dei dispositivi a semiconduttore di cui si parli nei prossimi capitoli.

In particolare, a causa dell'eccesso di lacune nella zona p e di elettroni nella zona n nasce tra le due zone una corrente di diffusione (Figura 14.9a) che tende a ricombinare

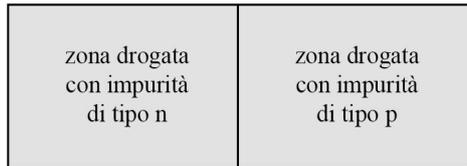


Figura 14.8 - Condizione esteriore di equilibrio elettrico di un semiconduttore.

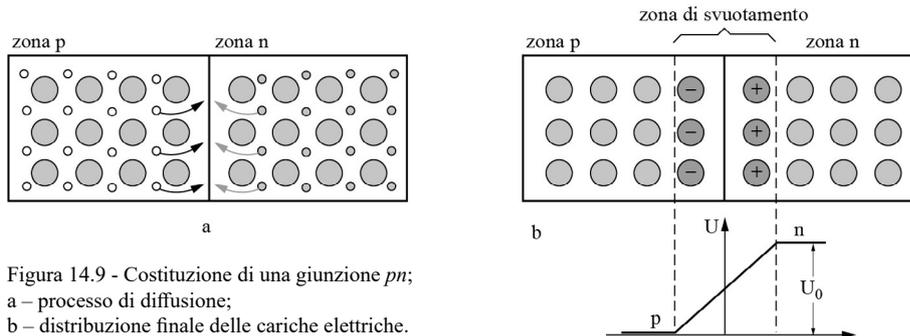


Figura 14.9 - Costituzione di una giunzione pn ;
a - processo di diffusione;
b - distribuzione finale delle cariche elettriche.

gli elettroni con le lacune e a trasformare la giunzione in una zona nella quale non ci sono più né elettroni liberi né lacune.

Il movimento di cariche elettriche durante il processo di diffusione dà origine ad un campo elettrico, ovvero ad una d.d.p. di contatto U_0 tra le zone p e n di giunzione, che contrasta il movimento di altri elettroni e lacune.

Il processo di diffusione, che dura soltanto alcuni nanosecondi, si esaurisce quando la d.d.p. U_0 tra le zone p e n raggiunge un determinato valore, tipicamente inferiore a 1 V, a seconda del tipo di semiconduttore. A questo punto nella giunzione pn si possono individuare tre diverse parti (Figura 14.9b):

- una zona di tipo p , nella quale sono presenti atomi neutri e lacune;
- una zona di tipo n , nella quale sono presenti atomi neutri ed elettroni liberi;
- una zona di svuotamento, nella quale sono praticamente assenti sia lacune elettroni liberi, mentre sono presenti ioni positivi e negativi contrapposti.

14.5 - Polarizzazione di una giunzione

Per polarizzazione di una giunzione pn s'intende l'applicazione di una d.d.p. tra le zone p e n per il controllo della conduzione.

Se la d.d.p. agisce in modo da bloccare la conduzione si dice che la giunzione è polarizzata negativamente o in senso inverso; se l'applicazione della d.d.p. favorisce, invece, la circolazione di corrente si dice che la giunzione è polarizzata positivamente o in senso diretto.

Se si applica una d.d.p. tra le due zone p e n di una giunzione, è possibile aumentare o diminuire l'effetto della d.d.p. di contatto conferendo alla giunzione stessa importante proprietà: presentare una bassa resistenza al passaggio della corrente in un senso ed una elevata resistenza in senso oppo-

sto.

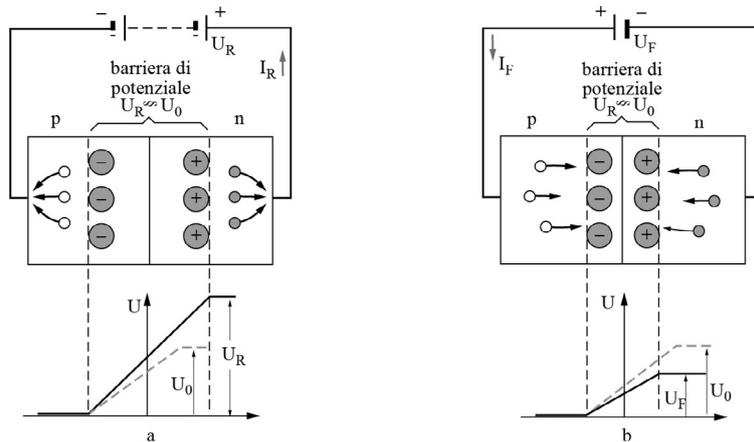


Figura 14.10 - Polarizzazione inversa (a) e diretta (b) in una giunzione pn.

Agendo in modo da determinare l'ampliamento della zona di svuotamento e quindi un aumento della d.d.p. U_0 (Figura 14.10a) si attua di fatto il blocco della conduzione: in questo caso si dice che la giunzione è polarizzata negativamente o in senso inverso e la d.d.p. applicata U_R prende il nome di tensione di polarizzazione inversa (reverse voltage).

Si osservi, tuttavia, che una giunzione polarizzata negativamente è sempre percorsa da una piccolissima corrente inversa I_R (reverse current) il cui senso di circolazione va, convenzionalmente, dalla zona n (+) alla zona p (—) ed è contrario a quella della corrente diretta I_F di cui si parlerà ora.

La polarizzazione inversa viene quindi adottata nei casi in cui, in determinate situazioni circuitali, si desidera bloccare (in realtà limitare a valori trascurabili) la corrente che percorre la giunzione pn .

Se la d.d.p. applicata alla giunzione ha invece l'effetto di limitare la zona di svuotamento e quindi annullare il campo elettrico (d.d.p. U_0) originatosi all'atto della costituzione della giunzione (Figura 14.10b), gli elettroni e le lacune sono liberi di muoversi attraverso la giunzione pn dando origine alla circolazione di una corrente elettrica. In questo caso la giunzione si dice polarizzata direttamente, la d.d.p. diretta esterna U_F (forward voltage) che è necessario applicare per portare la giunzione pn a conduzione prende il nome di tensione di soglia, mentre la corrente I_F che percorre una giunzione pn polarizzata in senso diretto viene denominata corrente diretta (forward current).

Una generica caratteristica voltamperometrica caratterizzata da due parti ben distinte (diretta ed inversa) di una giunzione pn è riportata in figura 14.11.

Osservando la caratteristica, si può rilevare come la corrente inversa I_R assuma un valore praticamente costante in quasi tutto il campo di tensione inversa in cui la giunzione funziona regolarmente.

Per ciò che riguarda la conduzione diretta, si può invece rilevare come ad aumento della d.d.p. esterna U_F corrisponda, per un buon tratto della caratteristica, un aumento pressoché proporzionale della corrente I_F .

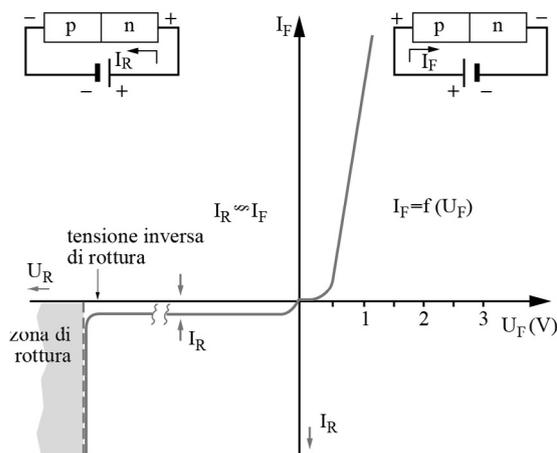


Figura 14.11 - Caratteristica voltamperometrica di una giunzione pn . Sulla caratteristica è evidenziata la zona di rottura.

14.6 - Rottura di una giunzione pn

L'effetto di moltiplicazione a valanga (rottura di una giunzione) si manifesta quando la d.d.p. applicata tra le zone p e n di una giunzione pn supera un certo valore.

Se la giunzione pn è composta da zone p e n fortemente drogate, il fenomeno della moltiplicazione a valanga viene denominato effetto Zener.

Se ad una giunzione pn polarizzata inversamente viene applicata una differenza di potenziale inversa U_R superiore a determinati valori ($10^5 \div 10^6$ V/cm), il campo elettrico all'interno della zona di svuotamento può raggiungere una intensità sufficiente per determinare la rottura (breakdown) della giunzione stessa.

Si osservi che il fenomeno della rottura della giunzione non significa la distruzione fisica della giunzione a meno che non venga dissipata nel semiconduttore una potenza superiore a quella sopportabile dal medesimo.

In queste condizioni i portatori di carica (elettroni liberi e lacune) vengono fortemente accelerati per cui urtando altri atomi danno l'avvio ad un fenomeno di moltiplicazione a catena che determina l'origine di una forte corrente inversa.

Questo fenomeno, detto effetto di moltiplicazione a valanga, viene utilizzato per la costruzione di un particolare tipo di diodo (diodo a valanga) che trova diverse applicazioni industriali.

Nelle giunzioni pn composte da zone p ed n fortemente drogate il fenomeno della moltiplicazione a valanga viene denominato effetto Zener e trova applicazione nella costruzione del diodo Zener, spesso utilizzato come stabilizzatore di tensione.

14.7 - Giunzioni pn simmetriche e asimmetriche

Una giunzione pn è detta *simmetrica* quando le zone p e n hanno la medesima concentrazione di cariche elettriche (lacune e elettroni liberi).
 Se la concentrazione di cariche nelle due zone non è la stessa, la giunzione si dice *asimmetrica*.

La giunzione pn di cui si è parlato in precedenza è detta di tipo *simmetrico* in quanto costituita da due regioni p ed n aventi la medesima concentrazione di lacune e di elettroni.

Questa condizione fa sì che nella regione p in prossimità dell'anodo, la corrente totale risulti costituita prevalentemente dal flusso di lacune (il flusso di elettroni è

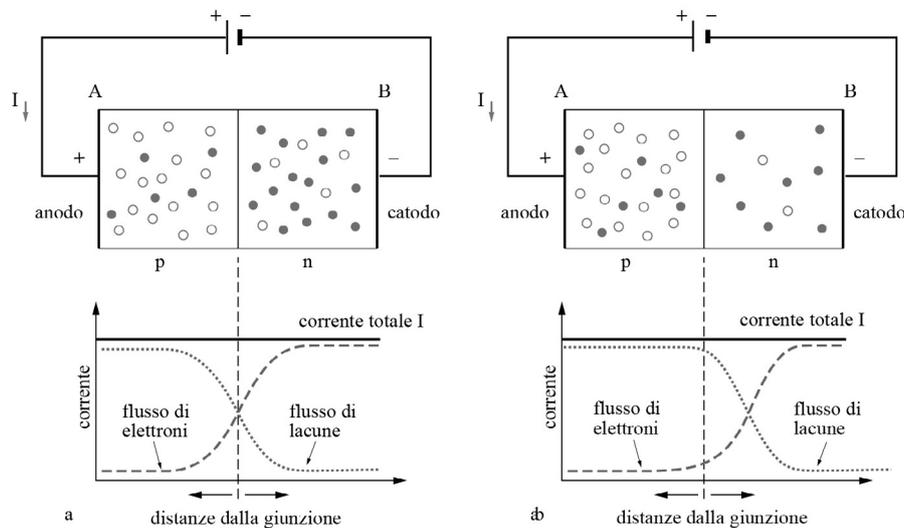


Figura 14.12 - Distribuzione delle cariche e andamento dei flussi di elettroni e di lacune in una giunzione polarizzata in senso diretto:
 a - giunzione simmetrica;
 b - giunzione asimmetrica.

molto limitato), mentre nella regione n in vicinanza del catodo la corrente è costituita principalmente da elettroni (il flusso di lacune è molto piccolo). In prossimità della giunzione pn inizia il processo di ricombinazione tra elettroni e lacune per cui passando dalla zona p a quella n aumenta il flusso di elettroni e diminuisce quello delle lacune con un andamento simmetrico rispetto alla giunzione (Figura 14.12a).

Una giunzione pn si dice invece *asimmetrica* quando la concentrazione di cariche nelle sue zone p e n non è la stessa, quando cioè è più intensa in una zona rispetto all'altra.

Questa situazione fa sì che la distribuzione dei flussi di elettroni e di lacune all'interno del cristallo non sia simmetrica rispetto al punto di giunzione, ma risulti spostata a destra o a sinistra a seconda della zona con più bassa concentrazione di cariche (Figura 14.12b).