

---

## 1.11 - Conduzione elettrica nei semiconduttori

In questo capitolo vengono studiati i fenomeni microscopici che stanno alla base della conduzione elettrica nei materiali detti «semiconduttori» (in quanto aventi caratteristiche intermedie tra i conduttori e gli isolanti) e i principali elementi che, valendosi di tali materiali, è possibile realizzare, cioè i diodi a cristallo e i transistori.

La nostra trattazione si limiterà ad un cenno sui fenomeni essenziali e sulle applicazioni più elementari.

È bene subito puntualizzare che gli elementi a semiconduttori trovano applicazioni in misura sempre crescente nelle più svariate apparecchiature elettroniche, spesso in sostituzione dei tubi a vuoto, rispetto ai quali presentano notevolissimi vantaggi (minime dimensioni, assenza di filamenti di accensione, possibilità di estendere il limite di impiego verso le alte frequenze).

Il funzionamento degli elementi semiconduttori è basato su principi totalmente diversi da quelli che caratterizzano il funzionamento delle valvole a effetto termoelettronico (v. parr. 1.10.2.4 e 1.10.2.5). In queste ultime infatti si ha un flusso di elettroni liberi nel vuoto: precisamente tali elettroni vengono emessi dalla superficie del catodo riscaldato e vengono accelerati da una d.d.p. positiva applicata tra anodo e catodo, mentre il loro flusso viene controllato da un segnale, cioè da una d.d.p. variabile applicata tra anodo e catodo (nel caso del diodo) o tra griglia e catodo (nel caso del triodo). Nei diodi a cristallo e nei transistori, invece, la corrente circolante si può schematicamente considerare come dovuta sia ad un

flusso di cariche elettriche negative (*elettroni*) che di cariche elettriche positive (*lacune*): tali cariche fluiscono nel reticolo cristallino di alcune sostanze solide che, in relazione appunto alle loro particolari caratteristiche di conducibilità elettrica, vengono dette *semiconduttori*.

Per comprendere il principio concettuale che giustifica il tipo di conduzione di questi materiali, è bene quindi far precedere la descrizione delle caratteristiche dei diodi a cristallo e dei transistori da una descrizione dei fenomeni microscopici che avvengono nei semiconduttori.

### 1.11.1 - Fenomeni microscopici che avvengono nei semiconduttori. Conduzione per elettroni e per lacune

Il nome di **semiconduttori** viene dato ad alcune sostanze <sup>(1)</sup> che, alla temperatura ambiente, presentano una resistività elettrica intermedia tra quella dei *conduttori* e quella degli *isolanti*. Infatti la resistività di questi materiali varia in una gamma da  $10^{-2}$  a  $10^4 \Omega \cdot m$  e risulta quindi molto più elevata di quella che caratterizza i più comuni materiali conduttori (argento, rame, nichel, alluminio, ecc.), ma molto più bassa di quella che contraddistingue i più

---

<sup>(1)</sup> Gli elementi semiconduttori più noti, in quanto impiegati nella realizzazione dei diodi a cristallo e dei transistori, sono il *germanio* (Ge) e il *silicio* (Si). Sono semiconduttori però anche altri elementi, come il *boro*, il *tellurio*, lo *stagno* grigio e il *fosforo* nero; mentre alcune proprietà da semiconduttori sono possedute dallo *zolfo* e dallo *iodio* e da alcuni composti organici.

comuni materiali isolanti (vetro, porcellana, gomma, mica, ecc.)<sup>(1)</sup>.

Questo diverso valore della resistività rispecchia il diverso modo con cui, nel reticolo cristallino delle varie sostanze, gli elettroni sono vincolati ai rispettivi nuclei atomici. Precisamente:

a) nei *metalli conduttori* la bassa resistività elettrica è da imputarsi al rilevante numero di elettroni periferici liberi di spostarsi da atomo ad atomo (elettroni di conduzione): tali elettroni quindi danno luogo ad una disordinata migrazione di cariche negli spazi interatomici, migrazione che si può però facilmente trasformare, sotto l'azione di un campo elettrico, in un ordinato flusso unidirezionale (corrente elettrica);

b) negli *isolanti* la elevata resistività elettrica è dovuta al fatto che gli elettroni periferici sono legati molto stabilmente ai rispettivi nuclei atomici e quindi non possono passare da atomo ad atomo, ma tutt'al più possono subire delle piccole oscillazioni nell'intorno del proprio nucleo: questi elettroni quindi sono in grado solo di orientarsi seguendo le fluttuazioni di un campo elettrico alternato applicato all'isolante, dando luogo ad una corrente elettrica alternata<sup>(2)</sup>;

c) nei *semiconduttori* si ha una situazione intermedia tra quella dei conduttori e quella degli isolanti; infatti:

— a **bassa temperatura**, e tanto più ci si approssima allo zero assoluto, i semiconduttori si comportano come degli isolanti. Infatti il legame che vincola ciascun atomo del reticolo cristallino agli atomi adiacenti è un **legame covalente**, cioè *gli atomi adiacenti hanno in comune gli elettroni di valenza*, cioè gli elettroni situati sull'orbita più esterna (v. fig. 284). Una tale modalità di accoppiamento tra atomo ed atomo implica che gli elettroni sono strettamente controllati dalle forze che li legano al nucleo atomico e perciò non sono in grado di dar luogo al fenomeno della conduzione elet-

(1) Come si vede dalla tab. IV del cap. 1.2, la resistività dei citati materiali conduttori è infatti dell'ordine di  $10^{-8} \Omega \cdot m$ , mentre quella dei citati materiali isolanti è dell'ordine di  $10^{12} \div 10^{14} \Omega \cdot m$ .

(2) Si pensi al passaggio della corrente elettrica alternata nell'isolante che costituisce il dielettrico di un condensatore.

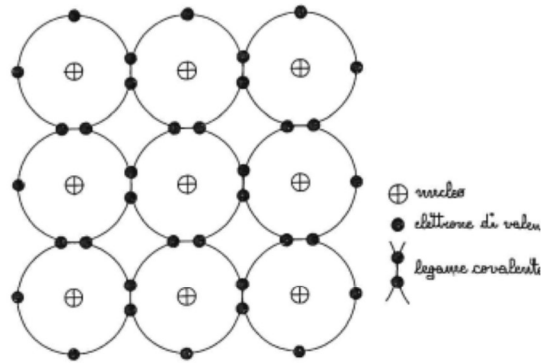


Fig. 284 - Rappresentazione schematica bidimensionale dell'accoppiamento tra atomo e atomo in un elemento tetravalente, cioè il cui atomo ha quattro elettroni di valenza; essi si accoppiano ciascuno con quattro elettroni di valenza di altrettanti atomi adiacenti (legame covalente). Si noti che, per semplicità, si è indicato di ogni atomo solo il nucleo e l'orbita più esterna (cioè quella che contiene gli elettroni di valenza).

trica (la loro resistività elettrica è molto elevata);

— al **crescere della temperatura**, però, alcuni dei suddetti legami si spezzano in conseguenza delle vibrazioni impresse agli atomi dall'aumento di energia termica (agitazione termica). Poiché ad ogni legame che si spezza corrisponde l'ottenimento di un elettrone mobile (v. fig. 285), è chiaro che, al crescere della temperatura, il semiconduttore verrà a trovarsi sempre più ricco di elettroni mobili e quindi sarà caratterizzato da una resistività

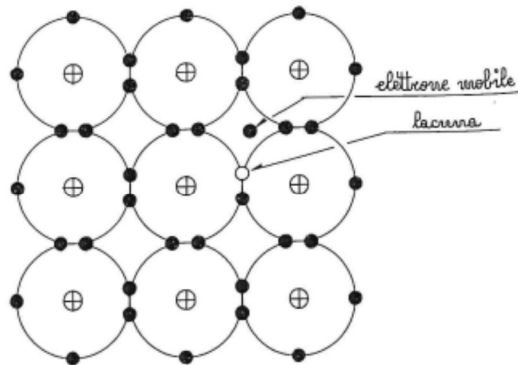


Fig. 285 - Rappresentazione schematica della rottura di un legame covalente, in seguito all'agitazione termica: tale rottura, sganciando dal reticolo cristallino un elettrone, provoca il formarsi nel reticolo stesso di una «lacuna».

elettrica sempre minore. Infatti ora l'applicazione di una d.d.p. ai capi del semiconduttore dà luogo ad un campo elettrico in grado di stabilire, all'interno del semiconduttore stesso, un flusso ordinato di elettroni, cioè una corrente elettrica di intensità crescente al crescere della temperatura (<sup>1</sup>).

È importante osservare che un semiconduttore allo stato puro è elettricamente neutro, cioè le cariche positive dei nuclei atomici sono in numero uguale alle cariche negative degli elettroni; per cui un elettrone che, conseguentemente alla rottura di un legame tra due atomi adiacenti, si sgancia dal reticolo cristallino, lascia in questo una **lacuna** (cioè un'assenza di elettrone) che si manifesta come una **carica elettrica positiva**, presente nel reticolo, avente lo stesso valore assoluto della carica negativa dell'elettrone.

In tale lacuna viene attratto il primo elettrone libero che abbia la ventura di avvicinarsi, dopo che esso stesso, avendo abbandonato il proprio atomo, vi ha a sua volta provocato la formazione di una lacuna: si comprende allora come il passaggio di questo elettrone dal proprio atomo fino ad andare a colmare la lacuna creatasi in un altro atomo, corrisponda in pratica ad uno spostamento nel verso opposto di una lacuna, la quale può essere assimilata ad una carica elettrica positiva microscopica avente lo stesso valore assoluto della carica negativa dell'elettrone. Generalizzando, il successivo spostamento di elettroni appartenenti a diverse zone del semiconduttore si può quindi assimilare ad uno spostamento nel verso opposto di una lacuna (v. fig. 286).

Riassumendo quindi e puntualizzando quanto in precedenza osservato, si può dire che:

1) per ogni temperatura diversa dallo zero assoluto si ha, nel reticolo cristallino di un semiconduttore allo stato puro, la rottura di un certo numero di legami tra atomi adiacenti;

(<sup>1</sup>) Si noti quindi che i semiconduttori, o differenzia dei conduttori, hanno una resistività elettrica decrescente all'aumentare della temperatura, cioè un coefficiente di temperatura negativo (v. par. 1.2.7). In particolare il germanio ha una resistività elettrica che si dimezza conseguentemente ad un aumento di 8 °C rispetto alla temperatura ambiente; il silicio ha una ancora maggiore diminuzione della resistività con la temperatura, pur mantenendo la sua resistività in un campo di valori molto più elevati rispetto a quelli del germanio.

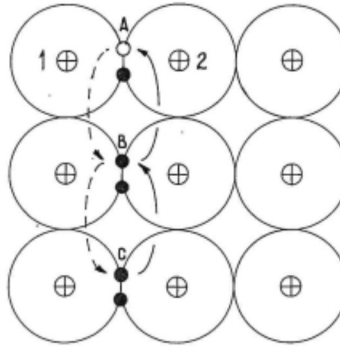


Fig. 286 - Si abbia una lacuna in A (conseguente alla rottura, per agitazione termica, del legame covalente esistente tra gli atomi 1 e 2). L'elettrone in B vada in A: si neutralizza così la lacuna in A e si crea una lacuna in B. L'elettrone in C vada in B: si neutralizza così la lacuna in B e si crea una lacuna in C. Concludendo, lo spostamento dell'elettrone da C a B e dell'elettrone da B ad A si può assimilare con lo spostamento della lacuna da A a B e da B a C.

2) la rottura di ciascuno di questi legami si può considerare dia luogo alla produzione di una coppia costituita da una carica elettrica negativa (*elettrone*) e da una carica elettrica positiva (*lacuna*), aventi lo stesso valore assoluto;

3) per ogni temperatura si può quindi considerare di avere, all'interno del corpo semiconduttore, una *migrazione disordinata di elettroni e di lacune*: il numero di elettroni e di lacune che partecipano a tale migrazione aumenta con l'aumentare della temperatura e corrispondentemente quindi aumenta la conducibilità elettrica del semiconduttore. Infatti l'applicazione di una d.d.p. ai capi del semiconduttore dà luogo ad un campo elettrico in grado di stabilire all'interno del semiconduttore stesso una **corrente elettrica** che si può considerare costituita:

— da un flusso di cariche elettriche negative (*elettroni*) che si muovono ordinatamente dalla zona del semiconduttore a potenziale minore verso la zona a potenziale maggiore;

— da un flusso di cariche elettriche positive (*lacune*) che si muovono ordinatamente in verso opposto, cioè dalla zona del semiconduttore a potenziale maggiore verso la zona a potenziale minore. All'aumentare della temperatura, aumenta questo flusso di cariche elettriche e quindi aumenta la conducibilità elettrica del

semiconduttore (o — che è lo stesso — ne diminuisce la resistività).

I corpi che, allo stato puro, hanno spiccate caratteristiche di semiconduzione, nel senso sopra specificato, sono i *cristalli degli elementi tetravalenti*, in particolare *germanio* e *silicio* <sup>(1)</sup>. Il motivo è che gli elementi tetravalenti hanno 4 elettroni simmetricamente distribuiti nell'orbita più esterna e quindi hanno la tendenza a formare un reticolo cristallino in cui gli atomi contigui, legandosi tra di loro mediante *legami covalenti*, si giustappongono in maniera tale da conferire all'edificio cristallino stesso una grandissima stabilità (v. fig. 284). I cristalli di tali elementi pertanto, purché purissimi <sup>(2)</sup>, godono delle seguenti proprietà:

— allo zero assoluto sono dei perfetti isolanti, non essendovi alcun elettrone libero di migrare da atomo ad atomo, all'interno del cristallo;

— solo aumentando sufficientemente la temperatura, i moti di agitazione termica riescono a spezzare un certo numero di legami covalenti tra atomi adiacenti e quindi a provocare il distacco dal reticolo di un certo numero di elettroni (e la conseguente formazione di un certo numero di lacune); a temperature ordinarie, i cristalli di germanio e silicio vengono così a possedere una certa conducibilità elettrica anche se estremamente piccola rispetto a quella di un conduttore metallico <sup>(3)</sup>: tale conducibilità è crescente con la temperatura.

Riportiamo in fig. 287 la rappresentazione spaziale della cellula elementare cubica di un cristallo di germanio e, in fig. 288, la rappresentazione schematica bidimensionale del reticolo cristallino di un cristallo di germanio puro.

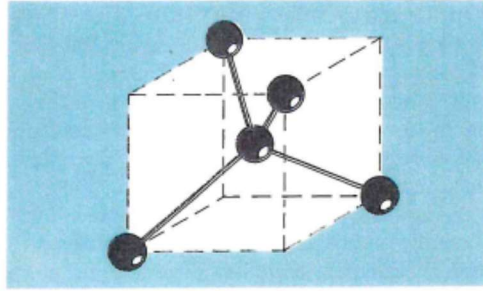


Fig. 287 - Rappresentazione spaziale della cellula elementare cubica di un cristallo di germanio. Le sfere rappresentano gli atomi di germanio (ciascun atomo può legarsi ad altri 4 atomi adiacenti) mentre i collegamenti tra le sfere rappresentano i legami covalenti (coppie di elettroni comuni tra due atomi adiacenti).

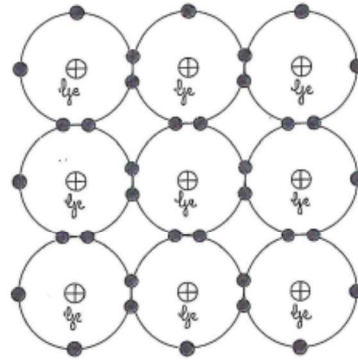


Fig. 288 - Rappresentazione schematica bidimensionale del reticolo cristallino di un cristallo di germanio puro.

### 1.11.2 - Semiconduttori estrinseci del tipo p e del tipo n

Un semiconduttore allo stato puro (di cui si è evidenziata la ridottissima conducibilità elettrica — crescente al crescere della temperatura — conseguente alla formazione casuale, a seguito dell'agitazione termica, di coppie elettrone-lacune) viene detto **semiconduttore intrinseco**.

*Per aumentare in maniera notevole la conducibilità elettrica del semiconduttore è necessario introdurre nel cristallo piccole quantità di altre sostanze, idonee a modificare la distribuzione di elettroni e lacune entro il cristallo stesso: un semiconduttore cui siano state aggiunte, per aumentarne la conducibilità elettrica, pic-*

<sup>(1)</sup> È infatti valendosi proprio di cristalli di tali due elementi che vengono universalmente realizzati i diodi a cristallo e i transistori.

<sup>(2)</sup> Per «cristalli purissimi» si intendono cristalli che non contengono alcuna interposizione di elementi estranei e in cui quindi sono rispettati rigorosamente i gradi di simmetria che li contraddistinguono.

<sup>(3)</sup> È infatti estremamente piccolo, alle temperature ordinarie, il numero di coppie elettrone-lacuna che, conseguentemente all'agitazione termica, riescono a prodursi all'interno del reticolo; e quindi è anche estremamente piccola la corrente elettrica costituita dai flussi ordinati delle suddette cariche elettriche nei cristalli di germanio e silicio, qualora ai capi del cristallo venga applicata una d.d.p.

cole quantità di impurità, si dice che è un *semiconduttore drogato*, o anche un **semiconduttore estrinseco**.

Vediamo di specificare quali sono le impurità da aggiungere al semiconduttore e analizziamo come conseguentemente si modifichi, all'interno del cristallo, la distribuzione di elettroni e lacune.

Diciamo innanzitutto che la conducibilità elettrica di un semiconduttore costituito da un elemento di valenza 4 (come sono appunto il germanio e il silicio), può essere fondamentalmente attivata «drogandolo» con elementi appartenenti a due classi, cioè:

1) **elementi di valenza 5** (ad es. arsenico, fosforo, antimonio, vanadio), cioè elementi i cui atomi presentano 5 elettroni nell'orbita più esterna;

2) **elementi di valenza 3** (ad es. boro, alluminio, indio, gallio), cioè elementi i cui atomi presentano 3 elettroni periferici.

Consideriamo ad esempio un cristallo di germanio al quale sia stata aggiunta una piccolissima quantità (nel rapporto di 1 parte su  $10^7$  o  $10^8$  di germanio) di un elemento pentavalente, ad es. arsenico (As). L'aggiunta di una tale impurità non è sufficiente ad alterare la struttura tipica del cristallo di germanio, ma accade semplicemente che in certe posizioni del reticolo cristallino un atomo di germanio,

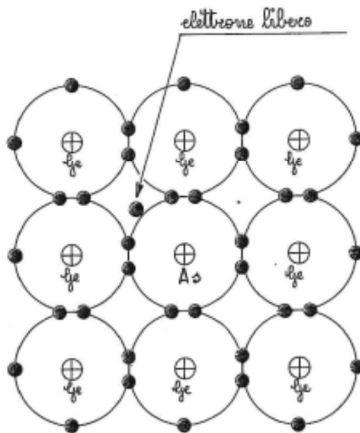


Fig. 289 - Rappresentazione schematica bidimensionale dell'effetto di attivazione del germanio da parte di impurezze di un elemento pentavalente (ad es. arsenico).

con 4 elettroni di valenza, viene sostituito da un atomo di arsenico, con 5 elettroni di valenza (v. fig. 289).

Succede così che 4 dei 5 elettroni di valenza dell'arsenico vengono a legarsi, mediante legami covalenti, con 4 atomi di germanio adiacenti, mentre il quinto elettrone di valenza non resta impegnato nel reticolo cristallino, essendo semplicemente legato — e debolmente — al suo nucleo, da cui basta per distaccarlo, già a temperatura ambiente, la semplice agitazione termica. Questo quinto elettrone è quindi relativamente libero di spostarsi all'interno del reticolo cristallino, analogamente agli elettroni di conduzione dei conduttori metallici.

Poiché per ogni atomo di arsenico inglobato nel reticolo si rende disponibile un elettrone libero nel semiconduttore, si comprende come basti l'aggiunta di una piccola quantità di questi atomi per modificare notevolmente la conducibilità elettrica del semiconduttore.

In generale si può quindi dire che *l'aggiunta ad un semiconduttore tetravalente di impurezze di un elemento pentavalente provoca un aumento nella conducibilità elettrica del semiconduttore, in quanto aumenta la quantità di elettroni liberi nel semiconduttore stesso: per questo fatto gli elementi pentavalenti (arsenico, fosforo, antimonio, vanadio) vengono detti elementi «donatori»*, mentre *il semiconduttore che viene attivato mediante impurezze di tali elementi «donatori» viene detto semiconduttore estrinseco «di tipo n»* (avvenendo principalmente la conduzione tramite il moto di cariche negative, cioè gli elettroni).

Si noti che il *germanio di tipo n* (ad es. quello schematizzato in fig. 289) è costituito da germanio a cui sono stati aggiunti, in ugual numero, *elettroni liberi* (gli elettroni di valenza — uno per ogni atomo di arsenico — che non sono entrati a far parte di legami covalenti) e *cariche positive legate al reticolo* (gli atomi donatori di arsenico che, conseguentemente al distacco dell'elettrone, diventano ciascuno uno ione positivo); pertanto il semiconduttore estrinseco è elettricamente neutro, essendo la carica positiva totale di tutti gli atomi donatori uguale alla carica negativa totale di tutti gli elettroni liberi.

Per evidenziare il tipo di conduzione che avviene in un semiconduttore di germanio *di tipo n*, si può

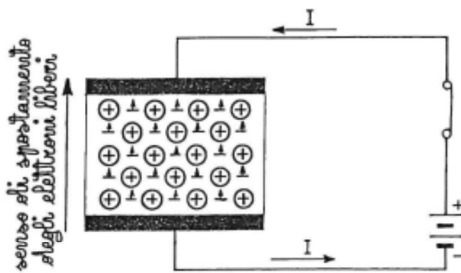


Fig. 290.

far ricorso al montaggio rappresentato in fig. 290, in cui, ai capi del semiconduttore, viene applicata, mediante una batteria, una tensione che dà luogo al passaggio di una corrente  $I$ (<sup>1</sup>). In tale figura il semiconduttore è stato schematizzato in maniera tale da mettere in risalto:

- i contatti ohmici estesi che consentono l'applicazione della tensione ai capi del semiconduttore;
- gli atomi donatori fissi di arsenico (ioni positivi);
- gli elettroni liberi e il loro senso di spostamento (dalla zona a potenziale minore verso quella a potenziale maggiore).

Si noti che se ora nel montaggio si inverte la polarità della batteria (v. fig. 291), si ha il passag-

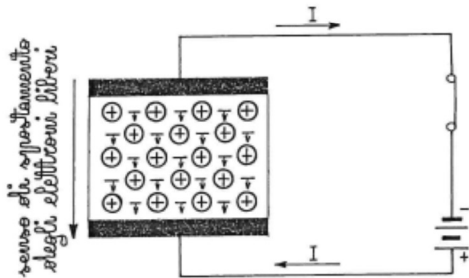


Fig. 291.

gio di una corrente della stessa intensità  $I$ , circolante però nel verso opposto: questo sta a dimostrare che *il germanio di tipo n non presenta alcuna*

(<sup>1</sup>) Si ricordi che, per convenzione, la corrente viene rappresentata circolare nei circuiti ohmici nel verso opposto di quello in cui si muovono gli elettroni di conduzione (v. par. 1.2.3).

proprietà di raddrizzamento della corrente, cioè la corrente passa allo stesso modo in un verso e nel verso opposto.

Consideriamo ora invece un cristallo di germanio al quale sia stata aggiunta una piccolissima quantità di un elemento trivalente, ad es. indio (In). In seguito all'aggiunta di una tale impurità accade che in certe posizioni del reticolo cristallino un atomo di germanio, con 4 elettroni di valenza, viene sostituito da un atomo di indio, con 3 elettroni di valenza (v. fig. 292).

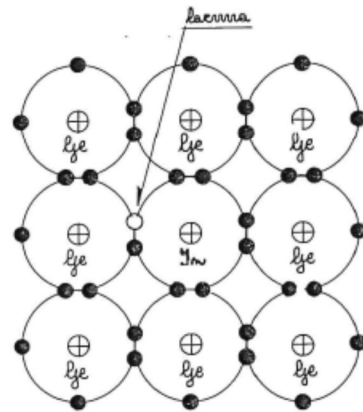


Fig. 292 - Rappresentazione schematica bidimensionale dell'effetto di attivazione del germanio da parte di impurezze di un elemento trivalente (ad es. indio).

Succede così che i 3 elettroni di valenza dell'atomo di indio sono sufficienti a saturare solo 3 dei legami covalenti con i 4 atomi di germanio adiacenti, mentre nel quarto legame covalente si manifesta l'assenza di un elettrone, cioè anche la presenza di una lacuna. Questa lacuna tende così ad attirare un elettrone che, già anche solo a temperatura ambiente, per effetto dei moti di agitazione termica, si sia svincolato da qualcuno degli atomi contigui di germanio: è allora in questo atomo di germanio che viene a manifestarsi l'assenza di un elettrone, cioè — in altre parole — è a questo atomo di germanio che viene trasferita la lacuna originariamente presente nell'atomo di indio. Questa lacuna è quindi relativamente libera di al-

lontanarsi dall'atomo di indio e di continuare poi a spostarsi successivamente all'interno del reticolo cristallino.

Poiché per ogni atomo di indio inglobato nel reticolo si rende disponibile una lacuna (cioè una carica elettrica positiva avente lo stesso valore assoluto della carica negativa dell'elettrone: v. par. 1.11.1) libera di spostarsi nel semiconduttore, si comprende come basti l'aggiunta di una piccola quantità di questi atomi per modificare notevolmente la conducibilità elettrica del semiconduttore.

In generale si può quindi dire che l'aggiunta ad un semiconduttore tetravalente di impurezze di un elemento trivalente provoca un aumento nella conducibilità elettrica del semiconduttore, in quanto gli atomi trivalenti, tendendo ad attirare elettroni, favoriscono la formazione di lacune positive libere nel semiconduttore stesso: per questo fatto gli elementi trivalenti (boro, alluminio, indio, gallio) vengono detti elementi «accettori», mentre il semiconduttore che viene attivato mediante impurezze di tali elementi «accettori» viene detto semiconduttore estrinseco «di tipo p» (avvenendo principalmente la conduzione tramite il moto di cariche positive, cioè le lacune).

Si noti che il germanio di tipo p (ad es. quello schematizzato in fig. 292) è costituito da germanio in cui figurano, in egual numero, lacune positive libere (che inizialmente si trovano negli atomi degli elementi accettori e che poi, catturando elettroni dagli atomi di germanio circostanti, si spostano in tali atomi) e cariche negative legate al reticolo (gli atomi accettori di indio che, conseguentemente alla cattura di un elettrone dagli atomi di germanio circostanti, saturano tutti e 4 i legami covalenti e si fissano stabilmente al reticolo cristallino, però diventano ciascuno un ione negativo): pertanto anche questo semiconduttore estrinseco è elettricamente neutro, essendo la carica positiva totale di tutte le lacune libere uguale alla carica negativa totale di tutti gli atomi accettori.

Per evidenziare il tipo di conduzione che avviene in un semiconduttore di germanio di tipo p, si può far ricorso al solito montaggio, ora rappresentato in fig. 293, in cui, ai capi del semiconduttore, viene applicata, mediante una batteria, una tensione che dà luogo al passaggio di una corrente  $I$ . In tale figura il semiconduttore è stato schematizzato in maniera tale da mettere in risalto:

— i contatti ohmici estesi che consentono l'applicazione della tensione ai capi del semiconduttore;

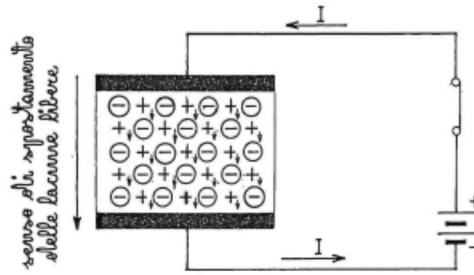


Fig. 293.

— gli atomi accettori fissi di indio (ioni negativi);  
— le lacune libere e il loro apparente senso di spostamento (dalla zona a potenziale maggiore verso quella a potenziale minore).

Si noti che se ora nel montaggio si inverte la polarità della batteria (v. fig. 294), si ha il passaggio di una corrente della stessa intensità  $I$ , circolante però nel verso opposto: questo sta a dimostrare che anche il germanio di tipo p non presenta alcuna proprietà di raddrizzamento della corrente, cioè la corrente passa allo stesso modo in un verso e nel verso opposto.

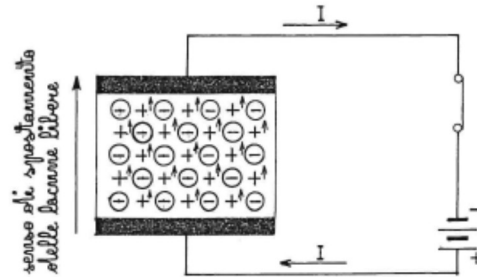


Fig. 294.

Dopo avere visto quali sono i meccanismi che portano all'attivazione del semiconduttore mediante l'aggiunta di impurità di elementi «donatori» (cui consegue la formazione di un semiconduttore estrinseco «di tipo n») o di elementi «accettori» (cui consegue la formazione di un semiconduttore estrinseco «di tipo p»), concludiamo l'argomento facendo alcune osservazioni.

a) La prima osservazione è che nei semiconduttori estrinseci « di tipo n » la conduzione — come dice il nome stesso — avviene principalmente tramite il moto di cariche negative (elettroni) e quindi tali elettroni vengono detti *portatori principali*; in questi semiconduttori però esiste anche un piccolo numero di cariche positive libere (lacune) che si producono a seguito dei processi esaminati trattando i semiconduttori intrinseci (v. par. 1.11.1), cioè la rottura di legami covalenti tra atomi di germanio (o di silicio) adiacenti, ad opera dei moti di agitazione termica: a tali lacune libere si dà il nome di *portatori secondari*.

Ragionando in perfetta analogia per i semiconduttori estrinseci « di tipo p », si può dire che in essi i *portatori principali* sono le lacune libere, mentre i *portatori secondari* sono gli elettroni che in piccolo numero si formano per la rottura, dovuta all'agitazione termica, di legami covalenti tra atomi di germanio (o di silicio) adiacenti.

b) La seconda osservazione è che se, come si è detto, il semiconduttore viene attivato mediante l'aggiunta di impurità nel rapporto di 1 parte su  $10^7$  o  $10^8$  di germanio (o di silicio), è necessario che il semiconduttore di partenza sia ad uno stato purissimo, cioè contenga impurità solo in percentuali estremamente inferiori a quelle che si vogliono aggiungere: solo così infatti sarà possibile ottenere che le impurità abbiano l'effetto desiderato nel modificare la distribuzione di elettroni e lacune entro il reticolo.

In pratica quindi, per ottenere questi semiconduttori estrinseci, si fa accrescere artificialmente il cristallo in una sua soluzione satura, di grande purezza, e, durante il suo stesso processo di crescita, lo si « droga » con minime percentuali dosate di un elemento « donatore » o « accettore » di elettroni.

### 1.11.3 - La giunzione p—n

Come si è visto nel paragrafo precedente, sia il cristallo semiconduttore di tipo p che quello di tipo n, presi separatamente, sono dei

buoni conduttori e la loro conduzione elettrica avviene indifferentemente sia in un verso che in verso opposto.

La situazione di conduzione però cambia se, in un unico cristallo semiconduttore, si effettua un « drogaggio » tale da realizzare due zone, una di tipo p (ricca di elementi « accettori ») ed una di tipo n (ricca di elementi « donatori »), confinanti tra di loro tramite una ben netta superficie di separazione: questa realizzazione prende il nome di **giunzione p—n** (v. fig. 295).

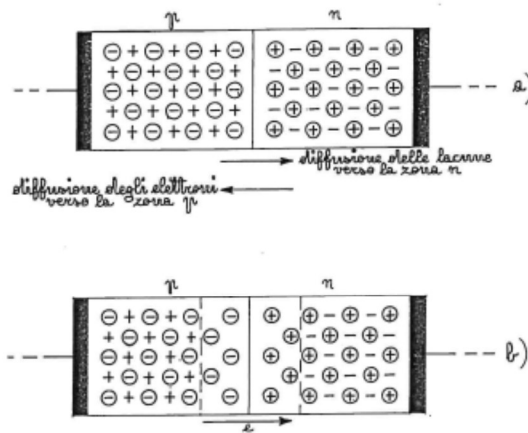


Fig. 295 - Rappresentazione schematica di una giunzione p—n: a) prima della diffusione; b) a diffusione avvenuta.

Come rappresentato schematicamente in fig. 295 a, si ha nella zona di tipo p una netta prevalenza di cariche libere costituite da lacune (che sono appunto i portatori principali di tale zona), mentre nella zona di tipo n si ha una netta prevalenza di cariche libere costituite da elettroni (i portatori principali di tale zona) (1).

(1) Si tenga però presente che nella zona di tipo p si ha anche la presenza di cariche libere costituite da elettroni (che sono i portatori secondari di tale zona), come pure nella zona di tipo n si ha anche la presenza di cariche libere costituite da lacune (i portatori secondari di tale zona). Però in ciascuna delle due zone il numero dei portatori secondari è più piccolo di un fattore dell'ordine di  $10^3 \div 10^4$  rispetto al numero dei rispettivi portatori principali.

Accade allora che tali cariche libere di segno opposto tendono ad attrarsi e si ha quindi:

— una diffusione di lacune della zona  $p$  verso la zona  $n$ ;

— una diffusione di elettroni della zona  $n$  verso la zona  $p$ .

Le lacune della zona  $p$  che diffondono nella zona  $n$  si ricombinano immediatamente con gli elettroni liberi di cui è ricca tale zona, come pure gli elettroni della zona  $n$  che diffondono nella zona  $p$  si ricombinano immediatamente con le lacune libere di cui è ricca tale zona: pertanto, se tale processo di diffusione dei portatori principali delle due zone potesse completarsi, si avrebbe che in brevissimo tempo essi verrebbero tutti ad elidersi a coppie.

Questo però non succede perché in un tempo brevissimo il suddetto processo di diffusione termina, venendosi a formare, nell'intorno della superficie di separazione delle due zone, quella che si chiama una *barriera di potenziale*. Accade infatti che nel suddetto intorno la neutralizzazione reciproca dei portatori principali mette in evidenza un doppio strato di cariche costituito da ioni negativi fissi della zona  $p$  e da ioni positivi fissi della zona  $n$ , affacciati tra di loro (v. fig. 295 b): tale doppio strato di cariche fa nascere, corrispondentemente alla giunzione, un campo elettrico di valore  $e$ , orientato nel senso che va dagli ioni negativi verso gli ioni positivi ed è chiaro che questo campo elettrico costituisce proprio una barriera di potenziale, in quanto si oppone all'ulteriore diffusione delle cariche libere, tendendo a respingere gli elettroni verso la zona  $n$ , e le lacune verso la zona  $p$ . Si arriva così in brevissimo tempo ad una condizione di equilibrio caratterizzata dalla seguente distribuzione di cariche: alla zona di tipo  $p$  più lontana dalla giunzione non arrivano più elettroni e quindi essa è elettricamente neutra (carica negativa degli ioni del reticolo uguale alla carica positiva delle lacune), mentre man mano che ci si avvicina alla giunzione è sempre maggiore il numero di elettroni che riescono ad arrivare e quindi è sempre maggiore la densità di carica elettrica negativa (ioni negativi del reticolo che si evidenziano); e, analogamente, alla zona di tipo  $n$  più lontana dalla giunzione non arrivano più lacune e quindi essa è elettricamente

neutra (carica positiva degli ioni del reticolo uguale alla carica negativa degli elettroni), mentre man mano che ci si avvicina alla giunzione è sempre maggiore il numero di lacune che riescono ad arrivare e quindi è sempre maggiore la densità di carica elettrica positiva (ioni positivi del reticolo che si evidenziano).

La stretta striscia di transizione — di spessore dell'ordine del  $\mu\text{m}$  — in cui esistono solo gli ioni fissi del reticolo e che quindi, essendo totalmente priva di portatori, è assimilabile ad un isolante perfetto, materializza appunto la *barriera* che viene a stabilirsi fra le due zone della giunzione: è al suo interno che si può considerare sussista il campo elettrico  $e$  (v. fig. 295 b).

Supponiamo ora di applicare alle due estremità del cristallo, tramite due contatti ohmici estesi, una tensione tale che il suo terminale positivo sia applicato alla zona di tipo  $p$  del cristallo e il suo terminale negativo alla zona di tipo  $n$  (v. fig. 296).

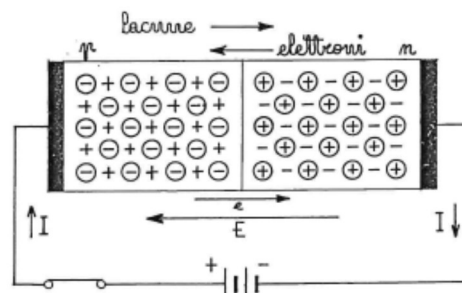


Fig. 296 - Rappresentazione schematica di una giunzione  $p-n$  polarizzata direttamente.

È chiaro che se in un tale montaggio l'interruttore viene mantenuto aperto, oltre a non aversi ovviamente alcun passaggio di corrente, si avrebbe per il cristallo la situazione rappresentata schematicamente in fig. 295 b, cioè la formazione del campo elettrico  $e$  che costituisce una *barriera* al passaggio di elettroni liberi dalla zona  $n$  alla zona  $p$  e al passaggio di lacune mobili dalla zona  $p$  alla zona  $n$ .

Chiudendo invece l'interruttore, ed applicando quindi la f.e.m. alle estremità del cristallo, si viene a creare in questo un campo

elettrico  $E$  (orientato dal contatto collegato con il polo negativo verso il contatto collegato con il polo positivo), che si sovrappone e si oppone al campo elettrico  $e$  che preesisteva nel cristallo. La predominanza del campo elettrico  $E$ , prodotto dalla batteria, sul campo elettrico  $e$ , di origine interna, provoca un effetto di rinforzo sulla tendenza alla diffusione dei portatori principali, facendo prevalere tale effetto sull'effetto bloccante prodotto dalla barriera di potenziale: si stabilisce pertanto una circolazione di elettroni dalla zona  $n$  alla zona  $p$  ed una circolazione di lacune dalla zona  $p$  alla zona  $n$  e tale doppio flusso di cariche determina nel circuito esterno il passaggio di una corrente di intensità  $I$  (v. fig. 296) <sup>(1)</sup>.

In tali condizioni quindi la **giunzione** conduce e si dice **polarizzata direttamente**: si noti che, dato l'elevato numero di cariche in movimento (portatori principali) *la corrente che attraversa la giunzione è elevata anche per basse d.d.p. applicate.*

Si noti che la conducibilità elettrica della giunzione risulta dalla somma delle conducibilità delle due zone  $p$  ed  $n$  che la costituiscono, conducibilità che non è detto necessariamente sia uguale per le due zone, dipendendo dalla maggiore o minore densità di portatori principali in tali zone.

Supponiamo ora di invertire la tensione applicata al cristallo, invertendo le polarità di alimentazione (v. fig. 297). In tal caso si viene

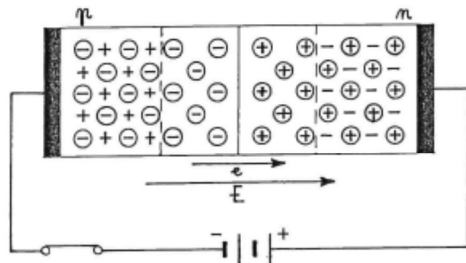


Fig. 297 - Rappresentazione schematica di una giunzione  $p-n$  polarizzata inversamente.

<sup>(1)</sup> Il verso di percorrenza fissato per la corrente nel circuito di fig. 296 risulta giustificato ricordando che il movimento apparente delle lacune avviene in senso opposto al movimento effettivo degli elettroni da esse catturati (v. par. 1.11.1) e ricordando la convenzione secondo cui la corrente viene rappresentata circolare nei circuiti ohmici nel verso opposto di quello in cui si muovono gli elettroni di conduzione.

a creare nel cristallo un campo elettrico  $E$  che si sovrappone al campo elettrico  $e$  preesistente nel cristallo, e si sovrappone nel senso di rafforzarlo. Viene così esaltato l'effetto bloccante prodotto dalla barriera di potenziale, come consegue dal fatto che sia le lacune mobili della zona  $p$  che gli elettroni mobili della zona  $n$  vengono respinti lontano dalla giunzione e aumenta quindi lo spessore di quest'ultima.

Essendo il piano di giunzione privo di portatori principali, la **giunzione** non conduce (o meglio ha una conducibilità molto limitata, come vedremo in seguito) e si dice **polarizzata inversamente** o **interdetta**: nel circuito di fig. 297 non si ha quindi un apprezzabile passaggio di corrente.

Si noti che in realtà, anche in queste condizioni di polarizzazione, si ha il passaggio di una piccola quantità di corrente attraverso la giunzione (cui consegue il passaggio di una piccola quantità di corrente attraverso il circuito). Tale *corrente inversa* è dovuta ai portatori secondari, cioè ai pochi elettroni liberi presenti nella zona  $p$  e alle poche lacune libere presenti nella zona  $n$ ; questi elettroni e lacune libere sono infatti in grado, sotto l'effetto del campo elettrico esistente nel cristallo, di diffondere attraverso la giunzione e di contribuire così al passaggio di una piccola quantità di corrente attraverso il circuito.

Poiché, come si è detto, la *corrente inversa* è dovuta alla presenza di portatori secondari nelle due zone del cristallo e poiché del resto il numero di tali portatori cresce al crescere della temperatura (v. par. 1.11.2), si avrà che anche *l'intensità della corrente inversa cresce con la temperatura.*

Da quanto sopra visto, si conclude che una *giunzione  $p-n$  presenta una conducibilità elettrica nettamente diversa nelle due direzioni*; essa infatti:

a) permette, anche con una piccola tensione applicata, lo stabilirsi di un notevole flusso di elettroni dalla zona di tipo  $n$  alla zona di tipo  $p$ , cioè — tenendo presente il verso convenzionale della corrente — un notevole passaggio di corrente dalla zona di tipo  $p$  alla zona di tipo  $n$ : in altre parole essa offre in tale verso una notevole conducibilità elettrica;

b) non consente, neanche con una tensione applicata abbastanza elevata, lo stabilirsi di un flusso di elettroni nel verso opposto, cioè offre una bassissima conducibilità elettrica dalla zona di tipo  $n$  alla zona di tipo  $p$ .

### 1.11.4 - Il diodo a giunzione

Dalle conclusioni del paragrafo precedente si può facilmente comprendere come un'opportuna giunzione  $p-n$ , realizzata in un cristallo di germanio o di silicio, venga a costituire l'elemento raddrizzatore dei semiconduttori: ad esso si dà il nome di **diodo a giunzione**.

Tale nome deriva chiaramente dal fatto che, per quanto detto, la giunzione  $p-n$  presenta una caratteristica « tensione applicata-corrente » alquanto simile a quella dei diodi a vuoto (v. par. 1.10.2.4).

Precisamente la suddetta caratteristica ha un andamento del tipo di quello rappresentato in fig. 298.

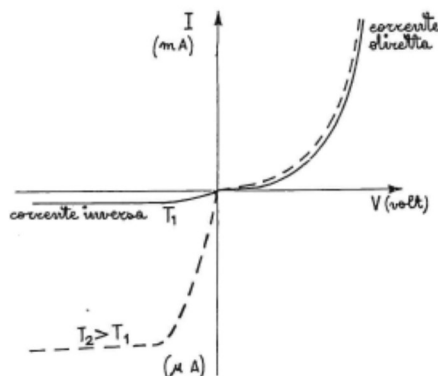


Fig. 298 - Caratteristica tensione-corrente in un diodo a giunzione. Si noti la diversa scala delle correnti diretta (mA) e inversa ( $\mu A$ ).

La curva del primo quadrante è quella relativa alla giunzione polarizzata direttamente (zona  $p$  collegata al polo  $+$  della batteria e zona  $n$  collegata al polo  $-$ ): si ha un elevato passaggio di corrente anche per una bassa tensione applicata alla giunzione (la curva ha un andamento esponenziale) <sup>(1)</sup>.

La curva del terzo quadrante è invece quella relativa alla giunzione polarizzata inversamente (zona  $p$  collegata al polo  $-$  della bat-

<sup>(1)</sup> Si noti che, quando la giunzione è polarizzata direttamente, è necessario porre in serie — in un montaggio come quello di fig. 296 — una opportuna resistenza, per impedire che la corrente troppo elevata porti alla distruzione della giunzione stessa (la massima corrente diretta ammissibile può variare, a seconda del diodo, da qualche decina di mA a molti A).

teria e zona  $n$  collegata al polo  $+$ ): si ha un debolissimo passaggio di corrente anche per una elevata tensione applicata alla giunzione (la corrente inversa cresce molto poco con la tensione applicata).

Si noti che il passaggio di corrente attraverso la giunzione polarizzata inversamente (*corrente inversa*) è dovuto al fluire dei portatori secondari nelle due zone del semiconduttore e quindi, come si è detto nel paragrafo precedente, esso cresce al crescere della temperatura (per temperature crescenti, la curva del terzo quadrante si va sempre più allontanando dall'asse delle ascisse: v. curva tratteggiata di fig. 298).

Quanto alla dipendenza della corrente inversa dalla tensione applicata, si è detto che tale corrente cresce molto poco con la tensione. È bene però precisare che questo è vero solo fino a che la tensione inversa non raggiunge un valore tanto elevato (variabile, a seconda del diodo, da pochi volt a qualche centinaio di volt) che il campo elettrico che si stabilisce nella giunzione:

— è in grado di comunicare agli elettroni liberi presenti un'energia tale da metterli in grado di spezzare i legami che uniscono altri elettroni ai rispettivi atomi (ionizzazione per urto); questi elettroni liberati assumono a loro volta un'energia tale da poterne liberare altri e si forma così una rapidissima moltiplicazione di cariche (*effetto valanga*);

— oppure è in grado di far superare agli elettroni liberi la tensione della barriera: anche in questo caso si ha un brusco aumento della corrente inversa (*effetto tunnel*).

Nel primo caso (ma anche nel secondo, a meno che il diodo non sia appositamente progettato per funzionare in un tale particolare stato di conduzione) la giunzione subisce dei danni irreparabili, in quanto avviene una vera e propria disgregazione del reticolo cristallino. È pertanto necessario assicurarsi che il diodo non sia fatto funzionare per tensioni inverse troppo elevate (variabili, a seconda del diodo, da pochi volt a qualche centinaio di volt).

Per completare l'esame della caratteristica tensione-corrente di un diodo a giunzione, si può farne un confronto con l'analoga caratteristica di un diodo a vuoto (v. fig. 299).

Si vede che la differenza tra le due caratteristiche consiste essenzialmente nei seguenti fatti:

1) il diodo a giunzione presenta una maggiore conduttività in senso diretto del diodo a vuoto (infatti — come si vede in fig. 299 — a parità

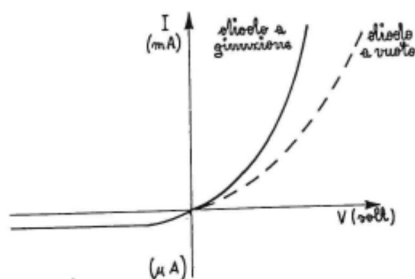


Fig. 299 - Confronto tra la caratteristica tensione-corrente di un diodo a giunzione e quella di un diodo a vuoto.

di tensione applicata, il diodo a giunzione viene attraversato da una corrente più intensa);

2) il diodo a giunzione presenta una certa corrente inversa (e crescente al crescere della temperatura), mentre nel diodo a vuoto si ha praticamente assenza di corrente inversa.

L'analogia messa in luce — in quanto entrambi elementi raddrizzatori (cioè con notevole disuniformità di conduzione in un verso e in verso opposto) — tra il diodo a giunzione e il diodo a vuoto, ha portato alla conseguenza che ciascuno dei due contatti ohmici estesi che consente l'applicazione della tensione ai capi del semiconduttore venga denominato rispettivamente **anodo** (quello collegato con la zona *p* del cristallo) e **catodo** (quello collegato con la zona *n* del cristallo). Infatti quando il primo contatto ohmico viene mantenuto positivo rispetto al secondo, si ha un passaggio di corrente attraverso il cristallo (come — in un tubo a vuoto — si ha un passaggio di corrente tra anodo e catodo quando il primo dei due elettrodi viene mantenuto positivo rispetto al secondo).

La simbologia di un diodo a giunzione — o più genericamente, di un diodo a cristallo —

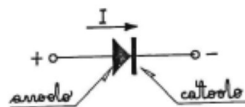


Fig. 300 - Simbolo elettrico di un diodo a cristallo.

è quella di fig. 300, che consente di evidenziare il verso di conduzione.

Si noti che i diodi a cristallo comprendono, come varietà realizzative, il *diodo a giunzione* (di cui in precedenza è stata data un'ampia descrizione) e il *diodo a punta di contatto*.

Quest'ultimo tipo di diodo consiste in una piccola piastrina di germanio o di silicio, fissata su di una base metallica, e di una spirale (« baffo ») di platino, contenuti in una capsula di vetro sigillata (v. fig. 301). Il « baffo » di platino funziona

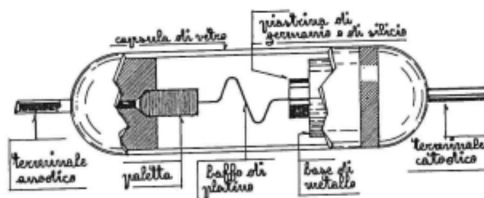


Fig. 301 - Realizzazione moderna di un diodo a punta di contatto.

da anodo, mentre la piastrina del semiconduttore funziona da catodo: la caratteristica di questo *diodo a punta di contatto* deriva dal fatto che esso consente un'elevata intensità di corrente elettrica dalla spirale verso la piastrina, anche sotto l'azione di una piccola tensione applicata; e, viceversa, una debolissima intensità di corrente elettrica nel verso opposto, anche sotto l'azione di una molto più elevata tensione.

La disposizione in fig. 301 è la versione moderna dei diodi a punta di contatto realizzati nei primi ricevitori radio, diodi che si valevano delle proprietà raddrizzatrici dei cristalli di alcuni minerali, come la *galena* (solfuro di piombo) e il *carborundum* (carburo di silicio).

Durante la seconda guerra mondiale, l'uso dei diodi a cristallo si è esteso al campo dei radar. Oggi il loro impiego comprende una vastissima gamma di applicazioni nel campo dell'elettronica, presentando tali componenti innegabili vantaggi, quali la piccolissima dimensione e peso, la grande solidità e durata, il fatto di non necessitare di calore (e quindi di filamenti di potenza), e il fatto di possedere elevatissimi rendimenti di conversione (95 ÷ 98%) nel raddrizzamento da corrente alternata a corrente continua.

### 1.11.5 - Il transistor

Si è visto, esaminando i tubi a vuoto (v. par. 1.10.2.5), come l'aggiunta di un terzo elettrodo (la griglia) in un diodo a vuoto abbia consentito di ottenere un tubo, il triodo, dotato di proprietà molto più interessanti. È naturale che,

per analogia, si sia cercato di ottenere qualcosa di equivalente al triodo a vuoto anche nel campo dei semiconduttori, giungendo così a realizzare quell'*elemento semiconduttore a tre terminali* cui si dà il nome di **transistore**.

Questo nuovo dispositivo elettronico fu realizzato nel 1948 da un gruppo costituito dai fisici americani William Shockley, John Bardeen e Walter H. Brattain, a seguito di dieci

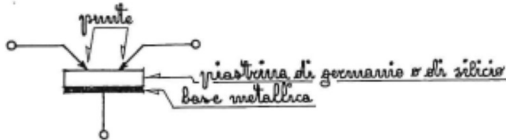


Fig. 302 - Rappresentazione schematica di un transistor a punta di contatto.

anni di ricerche specifiche sulla fisica dei semiconduttori effettuate nei laboratori della Bell Telephone. Precisamente, avendo come elemento di partenza il diodo a punta di contatto, essi, a seguito dell'impiego di una seconda punta, realizzarono il prototipo del *transistore a punta di contatto*: il quale però presentava l'inconveniente che, per ottenere una interazione apprezzabile tra le punte, era necessario che esse fossero eccezionalmente vicine (circa 1/100 di mm).

Successivamente, prendendo come elemento di partenza il diodo a giunzione, fu realizzato il *transistore a giunzione*, il quale non è altro che un semiconduttore che presenta, anziché una, due giunzioni (1). Tali giunzioni danno luogo a tre distinte zone del semiconduttore, a ciascuna delle quali può venire collegato un elettrodo metallico, onde consentire l'utilizzazione elettrica del dispositivo così ottenuto: le due regioni estreme del semiconduttore prendono il nome di *emettitore* e di *collettore*, mentre la zona interna alle due giunzioni prende il nome di *base*.

(1) Si noti che, con il procedere delle conoscenze sui semiconduttori e con l'adozione di nuove tecniche costruttive e di nuovi processi di fabbricazione, si è arrivati a produrre una vastissima gamma di tipi di transistori che si adattano alle più svariate esigenze, come i transistori idonei a dissipare elevate potenze, o quelli idonei a funzionare alle più alte frequenze (*transistori a barriera di superficie*).

Si noti che:

— se le due zone esterne sono di tipo *p* e quella centrale di tipo *n* (vedi fig. 303), si ha il **transistore** cosiddetto **p—n—p**: esso si può pensare ottenuto unendo tra di loro due diodi a giunzione tramite le rispettive zone di tipo *n*;

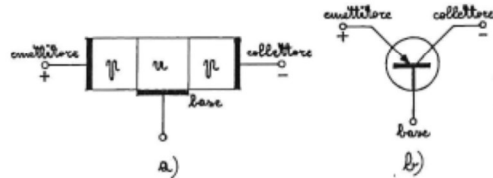


Fig. 303 - Transistore p—n—p: a) rappresentazione schematica; b) simbologia.

— se le due zone esterne sono di tipo *n* e quella centrale di tipo *p* (v. fig. 304), si ha il **transistore** cosiddetto **n—p—n**: esso si può pensare ottenuto unendo tra di loro due diodi a giunzione tramite le rispettive zone di tipo *p*.

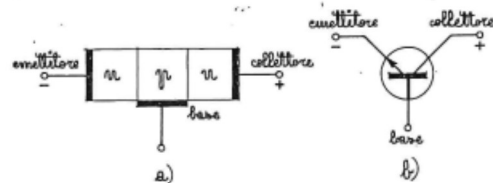


Fig. 304 - Transistore n—p—n: a) rappresentazione schematica; b) simbologia.

Per comprendere il principio di funzionamento del transistor, facciamo riferimento ad esempio al *transistore p—n—p* (le considerazioni che verranno fatte essendo poi facilmente convertibili anche al *transistore n—p—n*), ed effettuiamo un'ipotesi che si dimostrerà errata: cioè consideriamo che sussista un'equivalenza elettrica fra il transistor di fig. 305 e il circuito di fig. 306, costituito

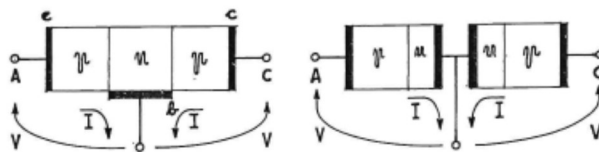


Fig. 305.

Fig. 306.

da due diodi a giunzione collegati in maniera da avere un elettrodo in comune e gli altri due distinti.

Supponiamo in un primo tempo di applicare tra i morsetti A e B e tra i morsetti C e B due tensioni uguali. Nel circuito di fig. 306 allora le due giunzioni risultano polarizzate entrambe nello stesso senso (ad esempio direttamente) e quindi, per questioni di simmetria, non si ha interazione tra l'ingresso del circuito (costituito dalla giunzione presente tra i morsetti A e B) e la sua uscita (costituita dalla giunzione presente tra i morsetti C e B). Ma un comportamento del tutto analogo, sempre per questioni di simmetria, è comprensibile che l'abbia anche il transistor di fig. 305: in tal caso quindi l'ipotizzata analogia mantiene la sua validità.

Tale validità però viene a cadere se le due tensioni applicate tra i morsetti A e B e tra i morsetti C e B sono diverse ed al limite se tali due tensioni hanno segno opposto (vedi le fig. 307 e 308: nella prima si è presa come tensione di riferimento quella della base; il terminale positivo rispetto alla base è l'emettitore, quello negativo è il collettore).

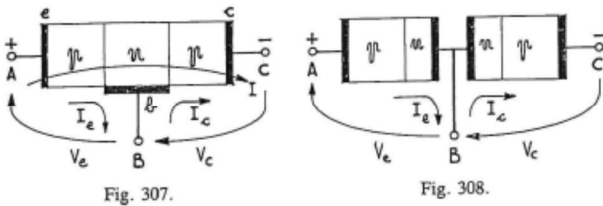


Fig. 307.

Fig. 308.

Infatti, con riferimento al circuito di fig. 308, si ha che la tensione  $V_e$  polarizza direttamente la giunzione all'ingresso del circuito e quindi dà luogo ad una corrente  $I_e$  relativamente grande anche se la  $V_e$  stessa è piccola; viceversa la tensione  $V_c$  polarizza inversamente la giunzione all'uscita del circuito e quindi dà luogo ad una corrente  $I_c$  molto modesta; ne consegue che la corrente  $I_e - I_c$  che arriva al morsetto B deve essere pur essa rilevante.

Invece nel transistor di fig. 307 le cose vanno in maniera ben diversa: infatti se resta vero che la corrente di emettitore  $I_e$  assume valori relativamente elevati anche per bassi valori della tensione  $V_e$  tra emettitore e base, si ha però

che tale corrente si richiude quasi totalmente all'uscita. In altre parole la corrente di collettore  $I_c$  non risulta affatto modesta, ma anzi è di intensità pressoché uguale alla  $I_e$  qualunque sia il valore della tensione  $V_c$ , purché di segno opposto a quello della  $V_e$ ; si può pertanto porre:

$$I_c = \alpha I_e \quad (1.249)$$

ove  $\alpha = 0,95 \div 0,99$ .

Ne consegue anche che la corrente di base, risultante dalla differenza  $I_e - I_c$ , è pressoché nulla.

Vediamo di renderci conto del motivo per cui la corrente di emettitore  $I_e$  si richiude quasi totalmente all'uscita.

Per questo, costruiamo un diagramma che riporta, in corrispondenza dei vari punti del transistor, la d.d.p. misurabile fra tali punti e la base (il cui potenziale viene assunto come quello di riferimento, cioè di valore nullo): si ottiene in tal modo il diagramma di fig. 309.

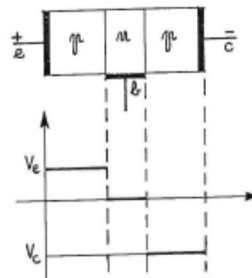


Fig. 309.

Si vede che ognuna delle tre zone del transistor si può considerare equipotenziale (e questo è verificabile mediante una misura della resistività del semiconduttore e il controllo che le cadute di potenziale tra punto e punto di una zona sono trascurabili rispetto alla tensione applicata alla zona stessa): pertanto la d.d.p.  $V_e$  applicata tra emettitore e base e la d.d.p.  $V_c$  applicata tra collettore e base vanno in pratica a localizzarsi ai capi delle due rispettive giunzioni del transistor.

Considerando la giunzione emettitore-base, si ha che essa è polarizzata direttamente e quindi viene attraversata da una corrente costituita da:

- lacune che passano dalla zona p alla zona n;
- elettroni che passano dalla zona n alla zona p.

Tuttavia, arricchendo l'emettitore di atomi « accettori » molto più di quanto la base sia arricchita di atomi « donatori », si può fare sì che la corrente che attraversa la giunzione sia dovuta prevalentemente a lacune: si ha quindi un elevato numero di lacune che si trasferiscono dall'emettitore alla base.

Considerando ora la giunzione base-collettore, si ha che essa è polarizzata inversamente e quindi:

— si oppone al passaggio degli elettroni della base;

— favorisce il passaggio delle lacune che, iniettate nella base dalla corrente di emettitore, diffondono facilmente attraverso la base stessa (di piccolo spessore) e, arrivate in prossimità della giunzione base-collettore, sono accelerate verso il collettore e pertanto superano facilmente la giunzione e raggiungono, per la loro quasi totalità, il collettore stesso <sup>(1)</sup>.

Pertanto le tensioni applicate al transistor fanno sì che la giunzione base-collettore sia attraversata da una corrente di poco inferiore a quella che attraversa la giunzione emettitore-base: ne consegue che la corrente di emettitore si richiude quasi totalmente all'uscita — e quindi è dimostrata la validità della 1.249) — mentre è minima la frazione di corrente che si convoglia attraverso la base <sup>(2)</sup>.

Naturalmente poi è da osservare che la corrente di collettore è dovuta, oltre alla corrente  $\alpha I_e$  imputabile alle lacune che, provenendo dall'emettitore, oltrepassano la giunzione base-collettore, anche alla corrente inversa  $I_{co}$  propria della giunzione stessa, imputabile ai portatori secondari. Tale corrente inversa dà un contributo trascurabile alla corrente di collettore; ad ogni modo, per maggiore esattezza, la 1.249) si dovrebbe scrivere nella forma:

$$I_c = \alpha I_e + I_{co} \quad 1.249')$$

Un discorso del tutto analogo potrebbe essere fatto per comprendere il principio di funzionamento del transistor  $n-p-n$ : ora soltanto dovrebbe essere invertito il segno delle d.d.p. applicate (emettitore negativo rispetto alla base e collettore positivo rispetto ad essa), come pure dovrebbero essere invertiti i ruoli degli elettroni e delle lacune.

<sup>(1)</sup> Naturalmente, se si inverte il segno della  $V_e$  (cioè se si rende il collettore positivo rispetto alla base), le lacune, giunte in prossimità della giunzione base-collettore, trovano un campo che le respinge indietro: in tal caso, allora, la corrente di emettitore si richiude quasi totalmente attraverso la base.

<sup>(2)</sup> Questa minima frazione di corrente si può considerare dovuta a quelle poche lacune che, iniettate nella base, non riescono a raggiungere, nonostante il piccolo spessore della base, la giunzione base-collettore, in quanto si ricombinano con gli elettroni liberi della base (presenti in essa pur sempre in un certo numero, essendo la base una zona di tipo  $n$ ).

Si noti che nella simbologia che normalmente viene adottata per i due tipi di transistori (v. fig. 303 b e fig. 304 b) la punta della freccia che caratterizza l'emettitore indica il verso secondo cui si muovono le lacune (o il verso opposto a quello secondo cui fluiscono gli elettroni).

### 1.11.6 - Il transistor come amplificatore

La disposizione del transistor finora considerata (in cui il circuito d'ingresso fa capo all'emettitore, il circuito di uscita fa capo al collettore e la base — comune ad entrambi i circuiti — si trova al potenziale di riferimento) è la disposizione cosiddetta *a base comune*.

Con riferimento sempre ad un transistor  $p-n-p$  vediamo di specificare meglio e di completare il circuito tipico del transistor *a base comune*, spiegando anche i motivi per cui, mediante un tale circuito, si può ottenere un notevole effetto di amplificazione dei segnali elettrici.

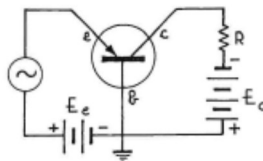


Fig. 310 - Circuito tipico di un transistor  $p-n-p$  nella disposizione *a base comune*.

Come si vede in fig. 310, la polarizzazione rispetto alla base dell'emettitore e del collettore viene ottenuta mediante le due batterie di f.e.m. rispettivamente  $E_e$  ed  $E_c$ : però nel circuito di emettitore viene in un qualche modo introdotto un segnale elettrico (il che viene schematizzato ponendo in serie alla batteria  $E_e$  un generatore di segnali), e tale segnale viene raccolto, nel circuito di collettore, ai capi di una forte resistenza  $R$  posta in serie alla batteria  $E_c$ , dopo che — come dimostreremo — ha subito una notevole amplificazione rispetto al segnale d'ingresso.

Per spiegare in maniera più evidente l'amplificazione che subisce il segnale, facciamo riferimento, invece che alla fig. 310, alla fig. 311 in cui, sia per il circuito di ingresso che per quello di uscita, si sono indicate solo le grandezze elettriche relative all'applicazione del segnale (tralasciando quelle relative allo stato normale di polarizzazione del transistor, in assenza di segnale) (1).

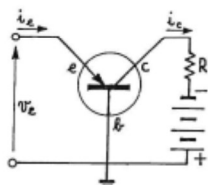


Fig. 311.

La potenza del segnale all'ingresso del circuito è esprimibile come:

$$P_i = v_e \cdot i_e$$

mentre quella all'uscita del circuito (cioè quella che si localizza ai capi della resistenza  $R$ ) è esprimibile come:

$$P_u = R \cdot i_c^2 \approx R \cdot i_e^2$$

tenendo presente che è  $i_c \approx i_e$ .

Per cui il guadagno in potenza fornito dal transistor è esprimibile come:

$$G = \frac{P_u}{P_i} = \frac{R \cdot i_e^2}{v_e \cdot i_e} = \frac{R \cdot i_e}{v_e} \quad (1.250)$$

Tale guadagno in potenza (che, essendo  $i_c \approx i_e$ , rappresenta anche il guadagno in tensione fornito dal transistor) può essere molto rilevante; infatti la  $v_e$  può essere molto piccola (dell'ordine di 0,1 V) mentre il termine  $R \cdot i_e$  può essere molto maggiore (dell'ordine di

(1) Si noti che la  $v_e$  — tensione fra emettitore e base conseguente alla sola applicazione del segnale — si poteva anche indicare con  $\Delta V_e$ , evidenziando così che a tale tensione si può dare il significato di una variazione della tensione  $V_e$  esistente fra emettitore e base a seguito della semplice polarizzazione del transistor, cioè in assenza di segnale. Analogamente la corrente di emettitore  $i_e$  e la corrente di collettore  $i_c$  conseguenti alla sola applicazione del segnale, potevano anche essere indicate come  $\Delta I_e$  e  $\Delta I_c$ .

10 V), a causa dell'elevato valore della resistenza  $R$ .

Il guadagno  $G$  si può porre anche in una forma più intuitiva della 1.250; infatti il rapporto  $\frac{v_e}{i_e}$  che in essa figura rappresenta la resistenza  $r_i$  che si vede ai morsetti di ingresso del transistor e che è praticamente la resistenza della giunzione emettitore-base.

Tale resistenza è deducibile quindi valendosi di una caratteristica tensione-corrente del tipo di quella fig. 298, e precisamente essa è il reciproco della pendenza di tale caratteristica (v. fig. 312):

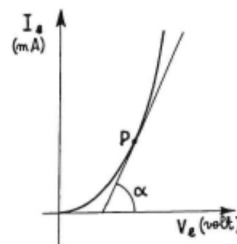


Fig. 312 - Caratteristica tensione-corrente della giunzione emettitore-base. P è il punto della caratteristica che corrisponde alle condizioni di polarizzazione del transistor.

Si ha che  $\text{tg } \alpha = \frac{1}{r_i}$ , cioè la resistenza di ingresso del transistor è data dal reciproco della pendenza della caratteristica.

si vede che la resistenza  $r_i$ , anche se non di valore costante (in quanto la caratteristica non è rettilinea), è pur sempre di valore piuttosto modesto.

Pertanto il guadagno  $G$ , esprimibile come:

$$G = \frac{R}{r_i} \quad (1.251)$$

cioè come rapporto tra la resistenza di uscita e la resistenza di ingresso del transistor, può assumere valori molto elevati, potendo la  $R$  essere molto elevata e la  $r_i$  avere invece valori molto modesti.

Facciamo un breve inciso per osservare che, da quanto in precedenza detto, cioè che in un transistor  $p-n-p$  si dà il nome di *emettitore* alla zona polarizzata positivamente rispetto alla base

e il nome di *collettore* alla zona polarizzata negativamente rispetto alla base, si potrebbe trarre la erronea conclusione che il transistor è una struttura perfettamente simmetrica e che quindi le due zone sono in grado entrambe di ricoprire la funzione di *emettitore* e di *collettore*, cambiando corrispondentemente solo di nome a seconda del segno della tensione di polarizzazione.

Questo però non è assolutamente vero, in quanto il transistor non è una struttura simmetrica, la sua dissimmetria essendo dovuta essenzialmente al fatto che la potenza dissipata sulla giunzione collettore-base risulta molto maggiore — per l'effetto di amplificazione visto — della potenza dissipata sulla giunzione emettitore-base. Le due zone *emettitore* e *collettore* non sono quindi assolutamente scambiabili, essendo necessario un loro diverso proporzionamento: tale proporzionamento è fatto in base a criteri termici tendenti ad evitare che nel transistor venga raggiunta, nel corso del suo funzionamento, una temperatura di pericolo (dell'ordine di  $70 \div 80^\circ\text{C}$ ) corrispondentemente a cui si inizierebbe la diffusione degli elementi additivi in tutto il transistor e quindi esso perderebbe le proprietà elettriche che lo caratterizzano.

Quanto in precedenza detto relativamente al funzionamento del transistor può essere sintetizzato schematizzando il transistor stesso come un *dispositivo in cui avviene un flusso di cariche « emesse » dall'emettitore e « raccolte » dal collettore, flusso che viene regolato dalla base* <sup>(1)</sup>.

È evidente quindi l'analogia esistente tra un transistor e un triodo; in particolare viene in-

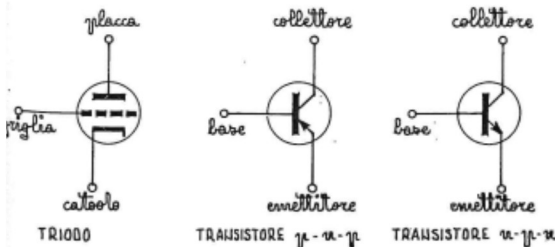


Fig. 313 - Analogia fra triodo e transistor.

<sup>(1)</sup> La zona della *base* infatti, come si è visto, serve ad isolare il circuito di ingresso dell'*emettitore* dal circuito di uscita del *collettore* e tale isolamento, dovuto alle barriere di potenziale intrinseche che si determinano in corrispondenza delle due giunzioni, può essere opportunamente alterato e regolato dalla polarizzazione che viene fornita agli elettrodi, e quindi dalle tensioni  $V_e$  e  $V_c$  che si stabiliscono rispettivamente tra *emettitore* e *base* e tra *collettore* e *base*.

tuitivo assimilare — in relazione ai comuni aspetti di funzionamento che li contraddistinguono — l'*emettitore* del transistor col *catodo* del triodo, la *base* con la *griglia di controllo* e il *collettore* con la *placca* (v. fig. 313).

Si noti che, nel caso del triodo, la tensione tra griglia e catodo dà luogo ad un campo elettrostatico in grado di controllare la corrente di placca: quindi con una corrente teoricamente nulla (non avvenendo in pratica assorbimento di corrente attraverso la griglia) si controlla la potenza utilizzabile nel circuito di placca.

Nel caso del transistor, invece, la tensione tra base ed emettitore svolge una funzione di controllo sulla batteria  $E_e$  che polarizza il collettore rispetto alla base, nel senso che la costringe ad erogare sul carico una potenza molto maggiore di quella che viene fornita all'ingresso.

### 1.11.7 - Circuiti tipici dei transistori nelle varie disposizioni che lo caratterizzano (base, emettitore o collettore comune)

Uno studio approfondito dei transistori richiederebbe che fosse introdotto l'argomento delle loro *curve caratteristiche*, in analogia con quanto fatto per il diodo a giunzione (v. par. 1.11.4) e similmente a quanto a suo tempo accennato per i triodi (v. par. 1.10.2.5). La complessità dell'argomento supera però gli scopi che questa trattazione elementare si propone. Per cui ci limitiamo a completare la esposizione sul transistor accennando al fatto che, in precedenza, si è sempre fatto riferimento alla disposizione con *base comune* (disposizione in cui il transistor si comporta

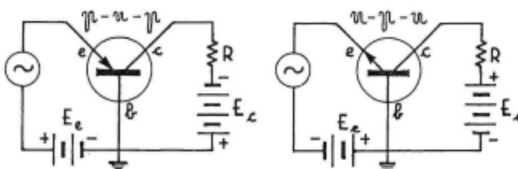


Fig. 314 - Circuito tipico di un transistor nella disposizione a base comune. Il circuito è caratterizzato da:

- impedenza d'ingresso molto bassa
- impedenza d'uscita molto alta
- guadagno di corrente = 1
- guadagno di tensione molto alto
- guadagno di potenza medio.

come amplificatore di potenza); esistono però altre due tipiche disposizioni circuitali — quella con **emettitore comune** e quella con **collettore comune** — in cui il transistor è caratterizzato da un diverso comportamento elettrico. Nelle

figure da 314 a 316 riportiamo, sia per un transistor  $p-n-p$  che per un transistor  $n-p-n$ , i circuiti tipici relativi alle tre suddette disposizioni e sintetizziamo anche il comportamento elettrico che le caratterizza.

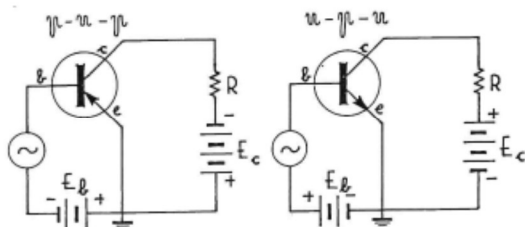


Fig. 315 - Circuito tipico di un transistor nella disposizione *ad emettitore comune*. Il circuito è caratterizzato da:

- bassa impedenza d'ingresso
- alta impedenza d'uscita
- alto guadagno sia di corrente che di tensione
- alto guadagno di potenza.

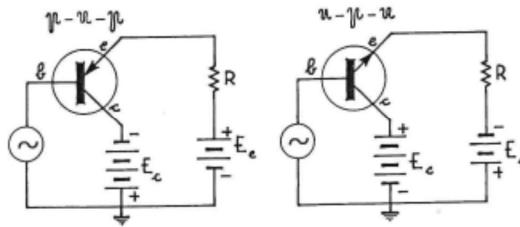


Fig. 316 - Circuito tipico di un transistor nella disposizione *a collettore comune*. Il circuito è caratterizzato da:

- impedenza d'ingresso molto alta
- impedenza di uscita molto bassa
- alto guadagno di corrente
- guadagno di tensione = 1
- basso guadagno di potenza.