

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 quindicesi: DIODI, TRANSISTORI E TIRISTORI

A cura della Redazione

15.1 - Diodi

I diodi sono dispositivi a semiconduttore a due terminali che, sfruttando la proprietà di conduzione unidirezionale della giunzione pn , permettono il passaggio di corrente in un senso (diretto) e la impediscono nell'altro senso (inverso).

Il diodo è costituito da una giunzione pn inserita in un apposito contenitore ceramico, metallico o plastico (Figura 15.1). Le zone p e n della giunzione e di relativi terminali di connessione sono denominati rispettivamente anodo e catodo.

In linea generale, la principale funzione dei diodi è quella di consentire il passaggio della corrente in un senso, quello diretto e impedirlo nell'altro, quello inverso.

La circolazione di corrente di un diodo dipende, come in una giunzione pn , dal tipo di polarizzazione. Si possono quindi distinguere tre diverse condizioni di funzionamento (Figura 15.2): non polarizzato, polarizzato direttamente e polarizzato inversamente.

Per l'impiego corretto dei diodi è indispensabile conoscere in dettaglio le loro principali caratteristiche di funzionamento. A questo proposito i costruttori forniscono dei grafici o delle tabelle che evidenziano l'andamento di alcuni parametri in funzione di altri. In figura 15.3 è rappresentata la caratteristica voltamperometrica di un diodo sulla quale, per comodità, sono state usate due scale diverse per le grandezze dirette e inverse.



Figura 15.1 - Segno grafico generale (a) e aspetto esterno di alcuni tipi di diodi (b).

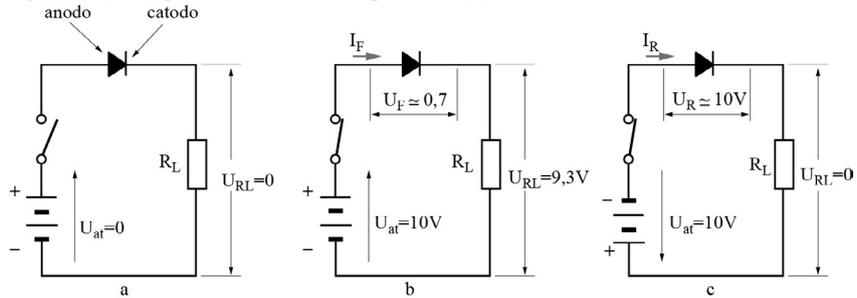


Figura 15.2 - Condizioni di funzionamento di un diodo:

- a - non polarizzato;
- b - polarizzato in modo diretto;
- c - polarizzato in modo inverso.

Retta di carico e punto di funzionamento

Il diodo, è un componente con caratteristica di funzionamento non lineare. Per definire le condizioni di lavoro (punto di funzionamento) è necessario considerare la retta di carico e la caratteristica del diodo.

Si consideri il circuito di figura 15.4 nel quale la tensione di alimentazione U_{al} viene applicata al resistore R attraverso un diodo. Se il diodo si trova in conduzione, si può osservare che applicando il secondo principio di Kirchhoff vale la relazione:

$$U_{al} = (R_d + R) I$$

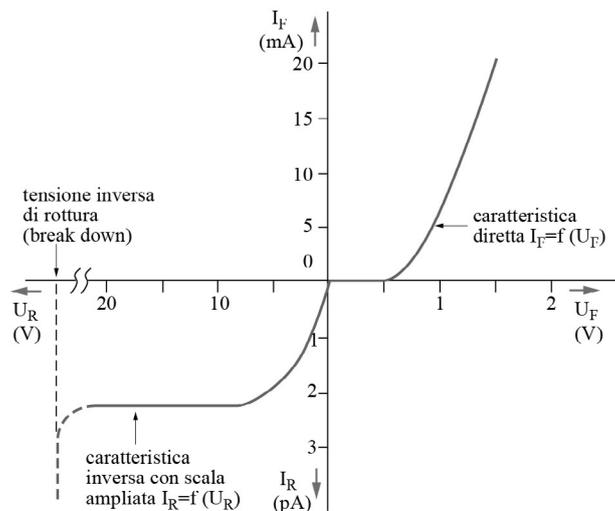


Figura 15.3 – Caratteristica voltametrica di un diodo al silicio.

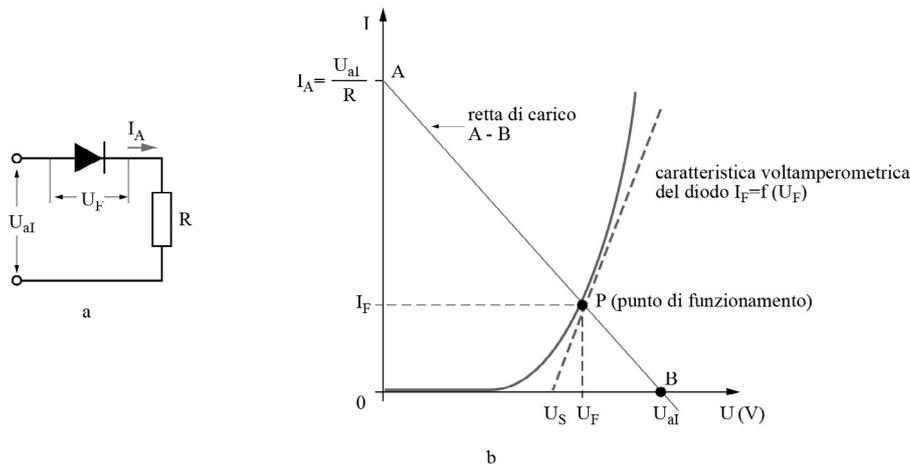


Figura 15.4 – Retta di carico e punto di funzionamento di un diodo.

nella quale R_d è la resistenza propria del diodo il cui valore varia in funzione della corrente essendo la caratteristica del diodo non lineare. Per tenere conto in modo semplice di questo fatto si può fare ricorso alla costruzione grafica descritta nella stessa figura.

La retta che congiunge i punti A e B è detta retta di carico e ogni suo punto corrisponde ad una possibile condizione di funzionamento del diodo.

Quando la resistenza interna del diodo è nulla la corrente, nella fase di conduzione è limitata dalla resistenza esterna (punto A).

Quando il diodo è in stato di blocco, essendo la corrente nel circuito nulla, risulta pure zero la caduta di tensione sulla resistenza R e pertanto la tensione ai capi diodo risulta uguale a U_{al} . Tale condizione è individuata dal punto B sulla caratteristica per il quale $I = 0$ e $U = U_{al}$.

Il punto P , individuato dall'intersezione della suddetta retta con la caratteristica voltamperometrica del diodo, è detto punto di funzionamento e definisce i valori I_F e U_F del diodo.

15.2 - Tipi di diodi

Tra i diodi di più largo impiego si esaminano nel seguito le caratteristiche dei raddrizzatori, degli Zener, dei diodi luminescenti e dei fotodiodi.

Diodo raddrizzatore

Inserendo questo componente in un circuito a corrente continua, quando la tensione diretta ai suoi capi supera tensione di soglia, esso passa in conduzione lasciando circolare una corrente diretta la cui intensità dipende dalle caratteristiche del circuito. Viceversa, in presenza di polarizzazione inversa, esso si lascia attraversare solo da una piccolissima corrente, dell'ordine del pico ampere (10^{-12} A).

Con riferimento alla figura 15.5, un diodo inserito in un circuito a corrente alternata sinusoidale conduce durante le semionde positive della tensione oppure durante

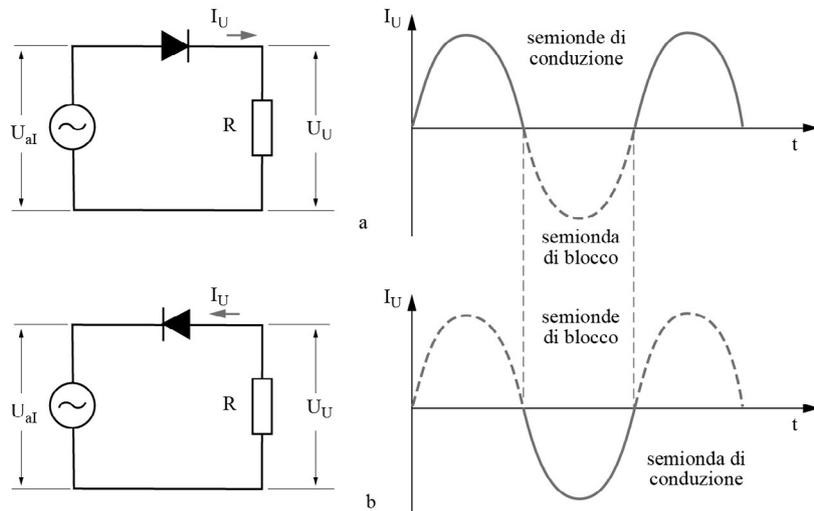


Figura 15.5 - Funzionamento di un diodo raddrizzatore inserito in un circuito a corrente alternata:

a - conduzione nei semiperiodi negativi;

b - conduzione nei semiperiodi positivi.

quelle negative a seconda del modo di inserzione: in entrambi i casi si ottiene una corrente pulsante che nel caso di carico puramente resistivo ha la forma indicata udite figure 15.5 a, b.

Dal punto di vista funzionale il diodo è fondamentalmente caratterizzato dalla corrente nominale che esso può portare permanentemente nella fase di conduzione e dalla tensione inversa cioè dalla tensione che può essere applicata permanentemente nella fase di blocco.

Esistono diodi di potenza con correnti fino a 1-2 kA e tensioni reverse fino a 2÷3 kV. Per certe applicazioni in alta tensione si usano diodi da 50÷100 mA e tensione inversa anche superiore a 100 kV.

Una distinzione tra i diodi può anche essere fatta in base alla frequenza a cui devono operare (alta e bassa frequenza).

Diodo Zener

Il diodo Zener (1905-1993) basa il suo funzionamento sul fenomeno di rottura della giunzione ed ha una caratteristica voltamperometrica di funzionamento del tipo rappresentato figura 15.6.

La tensione inversa in corrispondenza della quale avviene la rottura della giunzione è detta tensione di Zener ed ha un valore praticamente indipendente dalla corrente che in questa zona della caratteristica è detta corrente di Zener.

Esistono oggi in commercio diodi Zener con tensione di Zener compresa tra qual e volt e qualche centinaio di volt. Sono invece tipici i valori della corrente di Zener impressi tra qualche milliampere e qualche centinaio di milliampere a seconda dei potenza del diodo.

I diodi Zener sono componenti abbastanza importanti in quanto consentono di stabilizzare in modo estremamente semplice la tensione continua di alimentazione dei circuiti elettronici.

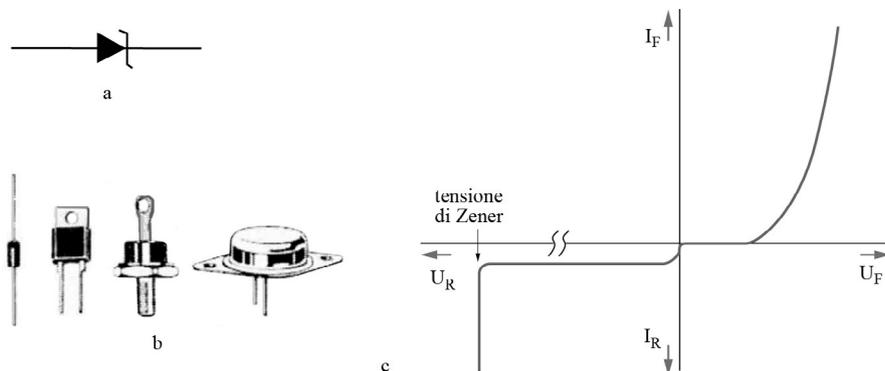


Figura 15.6 - Segno grafico (a), aspetto esterno (b) e caratteristica voltamperometrica (c) di un diodo Zener.

Un semplice esempio di circuito stabilizzatore, realizzato con un diodo Zener, rappresentato nella figura 15.7.

Se la tensione U_{al} supera il valore della tensione di Zener U_z il diodo conduce ai suoi capi la tensione si mantiene così al valore praticamente costante di U_z . Il valore della resistenza R deve essere tale da limitare la corrente nel diodo e non provocarne il cedimento termico. I due resistori R_1 e R_2 , devono presentare una resistenza totale piuttosto elevata rispetto a R e il rapporto $(R_1 + R_2)/R_2$ deve essere scelto in modo da ottenere ai capi di R_2 , il valore di tensione U_c voluto, comunque inferiore a U_z .

Diodo luminescente (LED)

Il diodo luminescente o diodo emettitore di luce (Figura 15.8), è noto comunemente con il nome inglese di LED (Light Emitting Diode) ed è di solito realizzato utilizzando l'arseniuro di gallio.

La conversione di energia elettrica direttamente in luce avviene per l'emissione sotto forma di fotoni (particelle di energia luminosa), dell'energia derivante dalla ricombinazione di elettroni e lacune in corrispondenza della giunzione pn . Infatti nella ricombinazione l'elettrone passa da un livello di energia maggiore ad uno minore con conseguente emissione di luce.

Il diodo emettitore di luce può colorarsi in modo diverso a seconda del valore della tensione di polarizzazione diretta che ad esso viene applicata.

Si può osservare che i valori usuali della tensione di polarizzazione diretta di un LED sono compresi tra 2,5 e 3 volte quella di un normale diodo al silicio.

Il LED viene solitamente utilizzato nelle apparecchiature elettroniche come segnalatore ottico, in sostituzione delle lampade ad incandescenza, in quanto esso consente

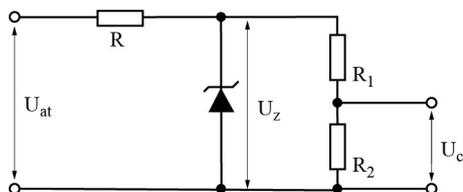


Figura 15.7 - Stabilizzazione di una corrente continua realizzata con un diodo Zener.

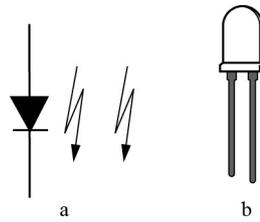


Figura 15.8 - Segno grafico (a) e aspetto esterno di un diodo LED (b).

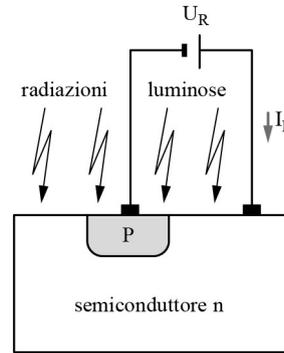


Figura 15.9 - Schematizzazione di un fotodiode.

durate di vita molto più elevate (¹) di queste ultime e, inoltre, non provoca apprezzabili dissipazione di calore.

Fotodiodi

Il fotodiode è costituito da una giunzione *pn* realizzate in modo da poter assorbire dell'energia luminosa con la massima efficienza (Figura 15.9).

In generale, quando un fascio di luce a frequenza sufficientemente elevata colpisce un semiconduttore, gli elettroni della banda di valenza, acquistando energia, risultano sospinti verso la banda di conduzione creando così un numero di coppie elettrone-lacune tanto maggiore quanto più elevata è l'intensità del fascio luminoso incidente.

Quando il fotodiode viene polarizzato inversamente, le coppie elettrone-lacuna vengono separate dall'inteso campo elettrico presente nella zona di giunzione e spinte in direzione opposta. In particolare gli elettroni vengono diretti verso la zona *n* e le lacune verso la zona *p*. La fotocorrente inversa I_R che percorre la giunzione risulta proporzionale all'intensità luminosa incidente.

I fotodiodi trovano numerose applicazioni in campo industriale (circuiti di contando, barriere di sicurezza ecc.), in quanto offrono, rispetto ai tradizionali dispositivi fotosensibili, il vantaggio di una più lunga durata ed un'area attiva estremamente ridotta.

15.3 - Transistore a giunzione (BJT)

*I transistori a giunzione sono componenti a semiconduttori nei quali la corrente di circolazione si basa sul contributo di entrambi i tipi di cariche elettriche presenti in una giunzione *pn* (elettroni e lacune). Per questo motivo i transistori a giunzione si dicono anche di tipo bipolare (BJT).*

Se si realizzano due giunzioni *pn* asimmetriche in modo tale che il blocchetto di materiale semiconduttore risulti costituito da due zone di tipo *p* separate da una sot-

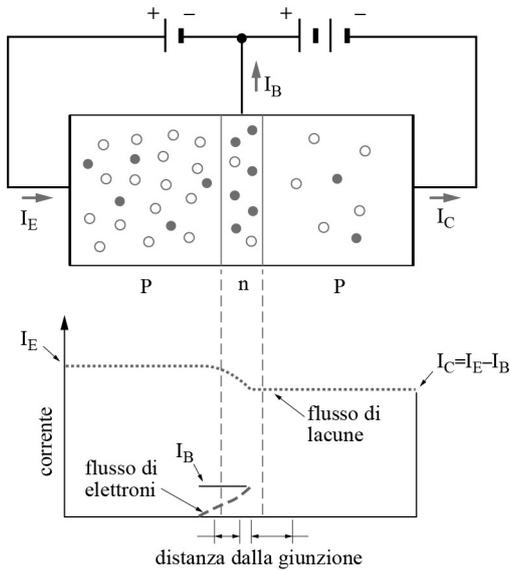


Figura 15.10 - Transistore di tipo *pnp* e correnti in esso circolanti:
 I_E - corrente di emettitore;
 I_C - corrente di collettore;
 I_B - corrente di base.

tile zona di tipo *n*, si ottiene un dispositivo a semiconduttore denominato transistore a giunzione bipolare (Bipolar Junction Transistor o BJT) ⁽²⁾ (Figura 15.10).

Questo tipo di transistore risulta quindi costituito da tre regioni *p-n-p* delle quali la prima è drogata in modo da avere un'elevata concentrazione di lacune rispetto al relativamente limitato numero di elettroni della zona *n*; la zona *n*, a sua volta presenta una concentrazione di elettroni maggiore rispetto al numero delle lacune della terza zona di tipo *p*.

La struttura relativa ad un transistore *n-p-n* risulta invece costituita da tre regioni *n-p-n* che realizzano ancora due giunzioni asimmetriche, ma separate in questo da una sottile regione centrate di tipo *p*.

I due tipi di transistori sono del tutto equivalenti e pertanto per comodità nel seguito si analizzerà il funzionamento del solo transistore *p-n-p*.

Polarizzando la prima giunzione di un transistore *p-n-p* in modo diretto e la seconda in senso inverso (Figura 15.10), la corrente in circolazione nel dispositivo risulta composta principalmente da lacune. Queste, una volta attraversata la prima giunzione che presenta una barriera di potenziale limitata a causa della polarizzazione si diffondono attraverso la regione centrale *n* e si ricombinano solo parzialmente con altrettanti elettroni. Infatti, dato che la larghezza della regione di tipo *n* è molto piccola rispetto alla lunghezza di diffusione delle lacune, solo una piccola parte di queste riesce a ricombinarsi prima di raggiungere la seconda giunzione; la maggior parte delle lacune perviene invece in prossimità della regione di carica spaziale della seconda giunzione dove il campo elettrico creato dalla polarizzazione inversa agisce in modo da spingere le lacune ad attraversare la seconda giunzione e a farle pervenire i seconda regione di tipo *p*. Una volta entrate in questa regione le lacune a causa limitato numero di elettro

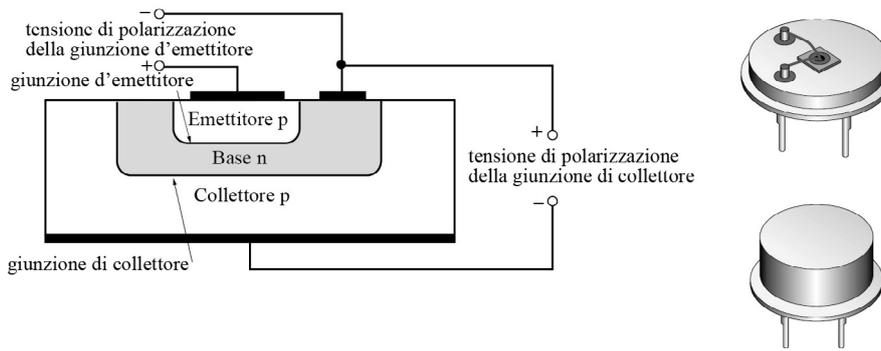


Figura 15.11 - Struttura tipica di un transistor a giunzione tipo $p-n-p$ (costruito con tecnologia planare).

ni presenti fluiscono verso il terminale esterno.

La corrente di lacune che scorre nella seconda regione di tipo p è solo leggermente inferiore alla corrente che attraversa la prima regione di tipo p .

Perciò con l'applicazione di una piccola tensione si riesce a produrre una corrente in un circuito a bassa resistenza (essendo la prima giunzione pn polarizzata direttamente, la sua resistenza è piccola) e a far circolare pressoché la stessa corrente in un circuito ad elevata resistenza (essendo la seconda giunzione polarizzata inversamente, la sua resistenza è grande) ottenendo così in uscita una tensione elevata e quindi, di fatto, un'amplificazione di potenza.

Una tipica struttura pnp di un transistor costruito con tecnologia planare (vedere Capitolo 16) è rappresentata nella figura 15.11; la prima regione p cui è applicata una tensione di polarizzazione positiva (diretta) è detta emettitore (E) perché inietta lacune, attraverso la prima giunzione polarizzata in senso diretto, nella regione centrale di tipo n , detta base (B). Alla seconda regione p , detta collettore (C), è applicata invece una tensione di polarizzazione negativa (inversa) per facilitare il passaggio delle lacune, iniettate dall'emettitore, dalla regione centrale attraverso la seconda giunzione pn polarizzata in senso inverso.

15.4 - Il guadagno dei transistori

I transistori sono capaci di rendere disponibile ai terminali di uscita, amplificato in ampiezza, un segnale di corrente o di tensione applicato ai terminali di ingresso.

Un transistor, indipendentemente dalla modalità di connessione, può essere sempre considerato come un quadripolo, ossia come un dispositivo munito di quattro terminali: due di ingresso e due di uscita (Figura 15.12). Poiché i transistori hanno tre terminali è evidente che uno di essi sarà comune all'ingresso e all'uscita (terminale di massa).

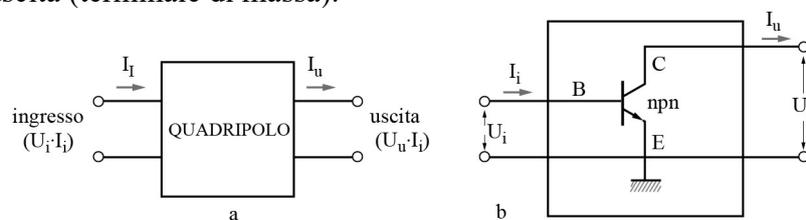


Figura 15.12 - Schematizzazione di un quadripolo (a) e rappresentazione di un transistor (b).

Viene in generale definito con il termine guadagno o amplificazione di corrente del quadripolo il rapporto tra la corrente d'uscita I_u e quella d'ingresso I_i :

$$\text{Guadagno di corrente} = \frac{I_u}{I_i}$$

Il guadagno di corrente viene indicato con un simbolo diverso a seconda della configurazione circuitale di impiego dei transistori.

Analogamente si definisce guadagno di tensione il rapporto tra la tensione d'uscita e quella d'ingresso:

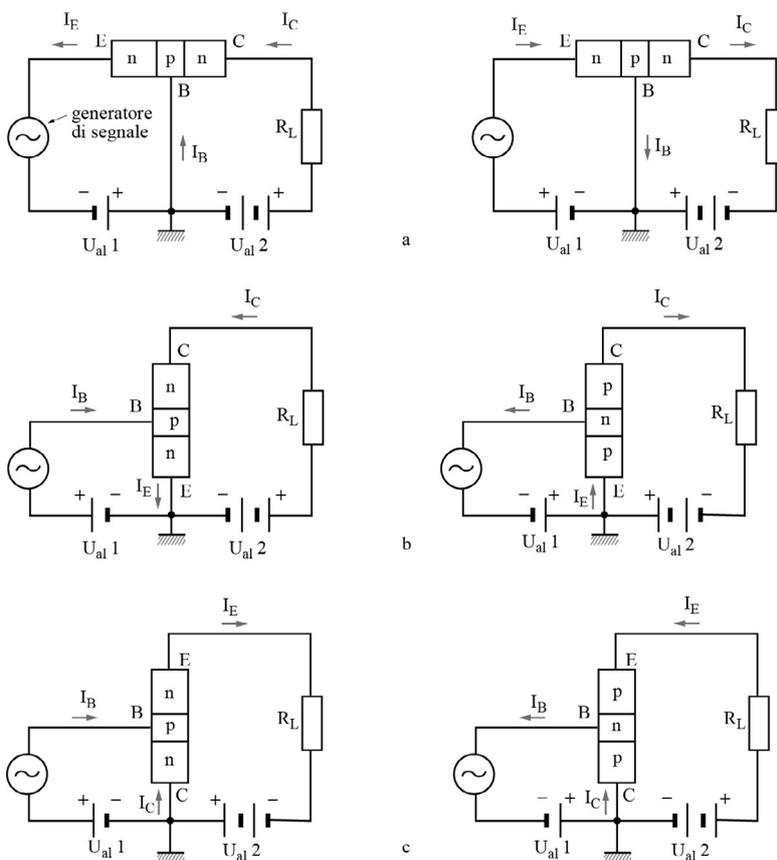


Figura 15.13 - Configurazioni circuitali dei transistori a giunzione a: a - a base comune; b - a emettitore comune; c - a collettore comune.

$$\text{Guadagno di corrente} = \frac{U_u}{U_i}$$

Si definisce guadagno o amplificazione di potenza il rapporto tra la potenza in uscita e quella in ingresso:

$$\text{Guadagno di corrente} = \frac{P_u}{P_i}$$

esso corrisponde, evidentemente, al prodotto tra i guadagni di corrente e di tensione.

Poiché i guadagni sono determinati dal rapporto tra grandezze omogenee, essi risultano espressi mediante numeri puri ossia adimensionali.

15.5 - Configurazioni circuitali dei transistori a giunzione

I transistori a giunzione vengono utilizzati nelle configurazioni circuitali a base comune, a emettitore comune e a collettore comune.

La differenza tra i tre tipi di configurazione dipende dall'elettrodo, collegato a massa, che viene resa comune ai terminali di entrata e di uscita.

Un transistore a giunzione può essere utilizzato nelle configurazioni circuitali del tipo a base comune, a emettitore comune e a collettore comune.

La denominazione dipende dall'elettrodo collegato a massa e reso comune ai circuiti d'ingresso e d'uscita.

La configurazione circuitale a base comune (Figura 15.13a) consente un notevole guarito di tensione, mentre il guadagno di corrente risulta sempre leggermente inferiore all'unità.

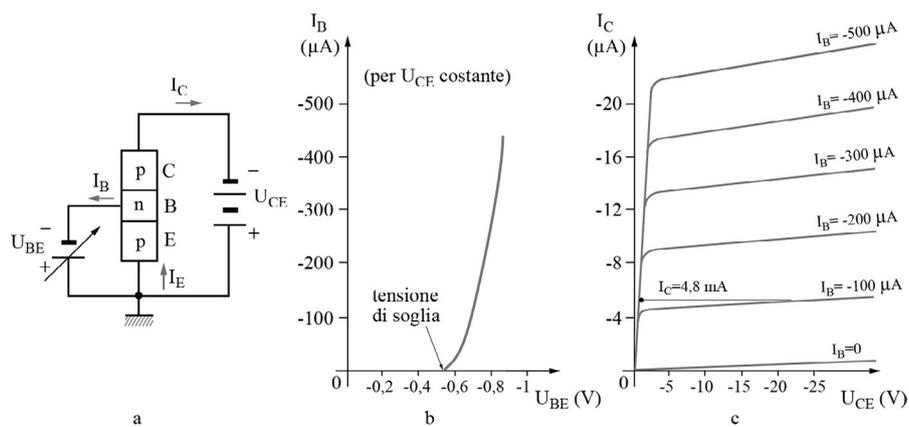


Figura 15.14 - Caratteristiche di funzionamento di un transistore *pnp* nella configurazione a emettitore comune:

a – schema di principio del transistore;

b – caratteristica di ingresso;

c – caratteristica di uscita;

U_{CE} = tensione tra collettore ed emettitore;

U_{BE} = tensione tra base ed emettitore.

La configurazione circuitale ad emettitore comune (Figura 15.13b) consente un elevato guadagno di corrente e un elevato guadagno di tensione.

La configurazione circuitale a collettore comune (Figura 15.13c) è la meno utilizzata nelle applicazioni pratiche in quanto, pur consentendo una buona amplificazione corrente, presenta un guadagno di tensione sempre inferiore all'unità.

Nella figura 15.14 sono riportate a titolo di esempio, le caratteristiche di funzionamento in corrente continua d'ingresso e d'uscita relative ad un transistore *pnp* in configurazione a emettitore comune.

La caratteristica d'ingresso (Figura 15.14b) rappresenta l'andamento della corrente di base I_B in funzione della tensione base - emettitore U_{BE} . Il valore della tensione d'ingresso U_{CE} , a cui inizia la conduzione della giunzione di emettitore, risulta di circa 0,6 ÷ 0,7 V in quanto la giunzione è polarizzata in senso diretto.

Le caratteristiche d'uscita mostrano l'andamento della corrente di collettore I_C in funzione della tensione collettore-emettitore U_{CE} per diversi valori della corrente di base I_B . Si osservi che, quando la corrente di base risulta nulla (circuitto emettitore-base aperto), nel circuito di collettore si ha comunque una piccola corrente.

Diagrammi di tipo analogo caratterizzano i transistori *nnp*. Per questi ultimi tuttavia si deve tener presente che le tensioni di polarizzazione e di conseguenza le correnti I_B , I_C e I_E risultano invertite (Figura 15.15).

Zone di funzionamento

Indipendentemente dalla configurazione circuitale in cui esso viene utilizzato, un transistore a giunzione presenta tre possibili zone di funzionamento (Figura 15.16):

- zona di saturazione (A);
- zona lineare (B);
- zona d'interdizione (C).

L'utilizzazione del transistore in zona lineare è relativa al suo impiego come amplificatore di segnale (di tensione o di corrente), mentre le zone di saturazione e interdizione caratterizzano il suo funzionamento come interruttore elettronico, ad esempio

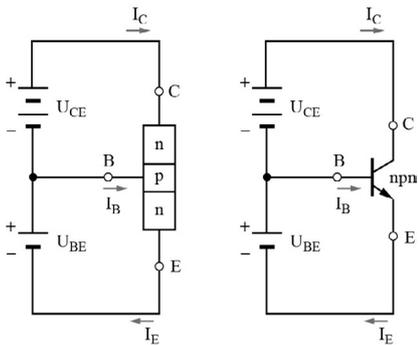


Figura 15.15 - Andamento delle correnti in un transistore a giunzione tipo *pnp*.

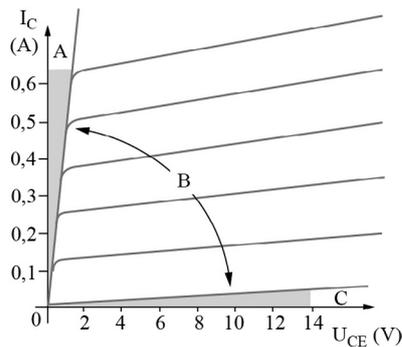


Figura 15.16 - Zone di possibile funzionamento di un transistore e giunzione tipo *pnp*.

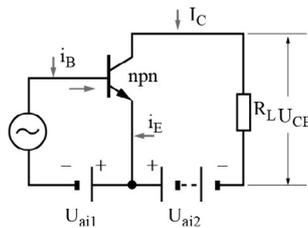
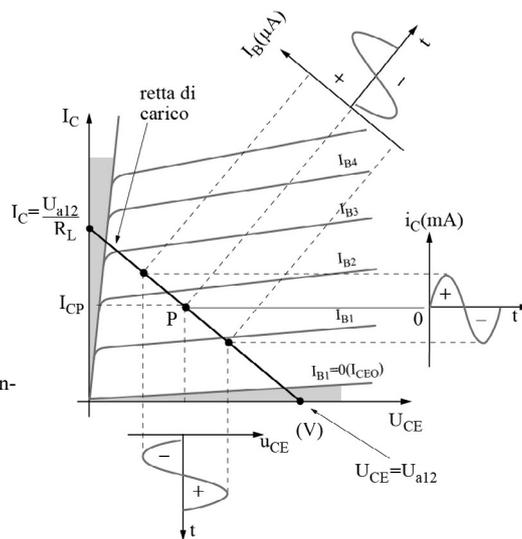


Figura 15.17 - Transistore bipolare *p-n-p* funzionante come amplificatore (zona lineare) nella configurazione ad emettitore comune:
 I_B - corrente di ingresso;
 $U_{CE} - I_C$ - tensione e corrente di uscita;
 $U_{CEP} - I_{CP}$ - tensione e corrente di polarizzazione (relative al punto P).



nei circuiti logici (vedere Capitolo 17). Il transistore può infatti operare l'apertura o la chiusura di un circuito in modo del tutto analogo a quanto effettuabile con un interruttore meccanico.

In particolare il transistore operante nella zona di saturazione corrisponde alla condizione di

interruttore chiuso, mentre quando lavora nella zona d'interdizione corrisponde alla condizione di interruttore aperto.

Un transistor, regolarmente polarizzato, opera nella zona lineare (B) quando il punto di lavoro si trova lontano dalle zone di saturazione e d'interdizione. Nella zona di funzionamento lineare la tensione collettore-emettitore U_{CE} e la corrente di collettore I_C , ossia il punto di lavoro del transistor è imposto dal valore prescelto dalle tensioni di polarizzazione in corrente continua.

Durante il funzionamento di un transistor bipolare in zona lineare ovvero come amplificatore di segnale, la giunzione base-emettitore (giunzione di emettitore) deve essere polarizzata in senso diretto mentre quella base-collettore (giunzione di collette) deve essere polarizzata in senso inverso.

Si osservi che la polarizzazione del traduttore non viene realizzata come indicato per semplicità nelle figure mediante batteria, ma con dei resistori, inseriti fra gli elettrodi, i quali determinano delle c.d.t. di valore opportuno.

Una schematizzazione del funzionamento di un transistor bipolare in zona lineali per la configurazione emettitore comune, è riportata in figura 15.1 la quale mostra l'amplificazione che il segnale in uscita I_C subisce rispetto al segnale in corrente alternata d'ingresso I_B . Si noti come la corrente d'uscita I_C risulti in opposizione di fase (180°) rispetto alla tensione d'uscita U_{CE} e in fase con la corrente d'ingresso I_B . Infatti a partire dall'istante $t = 0$ la corrente d'ingresso I_B inizia ad aumentare e così pure la corrente d'uscita I_C , mentre corrispondentemente la tensione U_{CE} inizia a diminuire rispetto alla tensione di polarizzazione U_{CEP} relativa al punto di funzionamento P prescelto.

15.6 - Transistori a effetto di campo (FET)

I transistori ad effetto di campo tipo FET sono componenti a giunzione pn nei quali il flusso delle cariche è controllato modificando la zona di carica spaziale della giunzione stessa tramite una appropriata tensione di polarizzazione inversa.

Il transistor FET (Field-Effect-Transistor) si può ritenere costituito da una barretta di silicio drogato con cariche di tipo n oppure di tipo p nella quale viene diffusa una zona drogata con cariche di segno opposto (rispettivamente p oppure n). Tra le due zone di semiconduttore nasce così una giunzione pn , caratterizzata da una sua zona di carica spaziale (Figura 15.18a, b).

Per completare la realizzazione del FET, al dispositivo così costituito vengono legati tre elettrodi denominati S - sorgente (source), D - derivatore (drain) e G - porta (gate).

La parte di semiconduttore posizionata sotto gli elettrodi S e D , e compresa tra essi, viene denominata canale ed è percorsa dalla corrente d'uscita I_D (o di derivatore) del transistor.

L'elettrodo di porta G viene chiamato anche elettrodo di controllo, in quanto applicando tra esso e la massa (sorgente S) una d.d.p. si modifica la zona di carica spaziale della giunzione pn e quindi varia la parte di essa che si estende nel canale. In tal modo varia anche la conduttività del canale, per cui si può controllare la corrente di derivatore I_D .

Come i transistori bipolare anche i FET sono di due tipi: a canale negativo (FET) o a canale positivo (p-FET) e possono essere utilizzati in tre diverse configurazioni circuitali (Figura 15.19):

- a sorgente comune (common source);
- a derivatore comune (common drain);
- a porta comune (common gate).

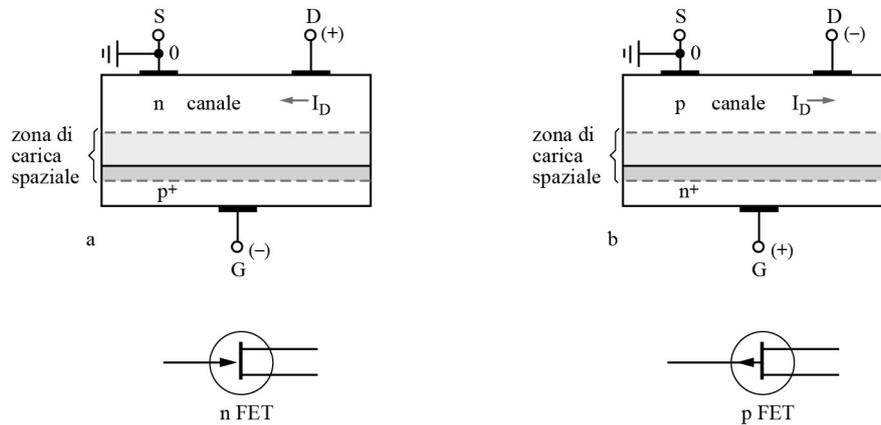


Figura 15.18 - Schematizzazione dei transistori a effetto di campo e loro segni grafici:
 a - tipo *n*-FET;
 b - tipo *p*-FET.

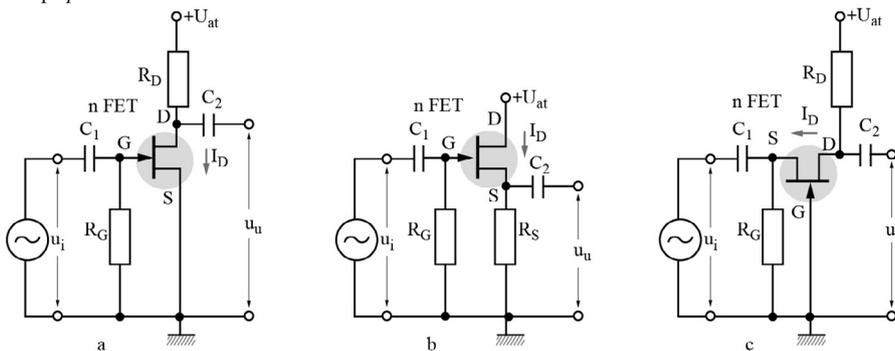


Figura 15.19 - Configurazione circuitale dei transistori *n*-FET (analoghe per i tipi *p*-FET):
 a - sorgente comune;
 b - a derivatore comune;
 c - a porta comune.

La denominazione dipende dall'elettrodo collegato a massa e reso comune a circuiti d'ingresso e d'uscita del dispositivo.

La configurazione d'impiego più vantaggiosa dei FET (paragonabile a quella ad emettitore comune dei transistori bipolari) è quella a sorgente comune. Tale contrazione consente un buon guadagno di tensione, praticamente senza assorbire alcuna corrente nel circuito d'ingresso del dispositivo.

La configurazione a derivatore comune viene utilizzata spesso come adattatore d'impedenza, in quanto consente di adattare un'elevata impedenza collegata sul circuito ingresso con una bassa impedenza collegata ai suo circuito d'uscita.

La configurazione a porta comune (paragonabile a quella a base comune dei transistori bipolari) consente anch'essa, come quella a sorgente comune, un buon guadagno di tensione; tuttavia questa configurazione viene utilizzata molto meno di quella sorgente comune.

Analogamente a quanto già visto per i transistori bipolari, anche il FET può assolvere a una delle seguenti funzioni circuitali:

- interruttore chiuso (zona di saturazione);
- amplificatore di segnale (zona lineare);
- interruttore aperto (zona di interdizione).

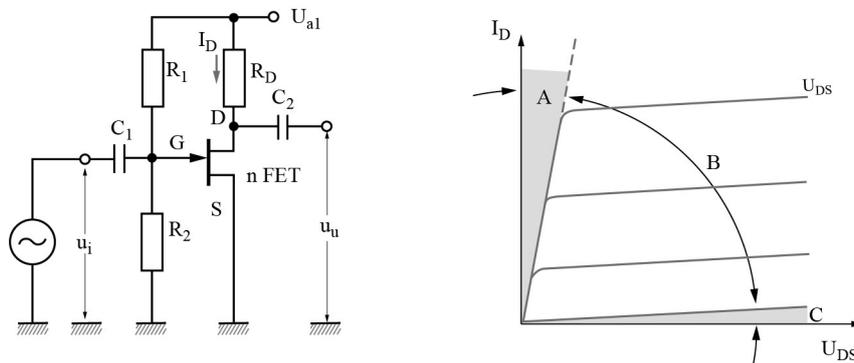


Figura 15.20 - Zone di funzionamento di un transistor FET nella configurazione a sorgente comune:

A - saturazione; B - lineare; C - interdizione.

Ad ognuna delle funzioni sopra indicate corrisponde il funzionamento del dispositivo in una specificata zona delle caratteristiche d'uscita (Figura 15.20).

Le tre zone *A*, *B* e *C* di possibile funzionamento del FET di figura 15.20 riferite alla configurazione d'impiego a sorgente comune: nella zona *A* assolve al funzione di un interruttore chiuso, nella zona *C* di interruttore aperto e nella zona *B* consente l'impiego come amplificatore di segnale.

15.7 - Transistori a effetto di campo tipo MOS

I transistori a effetto di campo tipo MOS sono componenti a giunzione pn nei quali l'elettrodo di controllo è separato dal semiconduttore da uno strato isolante formato da ossido di silicio. La caratteristica fondamentale di questi transistori è quella di presentare una resistenza d'ingresso molto elevata.

Il transistorore ad effetto di campo tipo MOS (Metal Oxide Silicon), denominata anche MOSFET, può essere visto in prima approssimazione come un FET a giunzione nel quale l'elettrodo di porta è separato dal semiconduttore da uno strato isolante costituito da ossido di silicio.

Un'importante caratteristica dei transistori MOS è rappresentata dalla loro elevatissima resistenza d'ingresso (fino a $10^{15} \Omega$): ciò è dovuto alla struttura metallo-ossido-semiconduttore, che è assimilabile ad un condensatore di bassa capacità (pochi picofarad).

Il successo del transistorore MOS è stato determinato anche dal fatto che esso consente un'estrema semplificazione del proprio circuito di polarizzazione, la qual cosa è importante soprattutto nei dispositivi, sia di tipo discreto che integrato, che utilizzano molti componenti attivi.

Anche i transistori MOS (come i FET a giunzione) sono dispositivi unipolari, in essi cioè circola un solo tipo di carica: elettroni o lacune.

Esistono due tipi di transistori MOS (Figura 15.21):

- a svuotamento (depletion);
- a riempimento o ad arricchimento (enhancement).

Ognuna delle due categorie di MOS sopra indicate (a svuotamento o a riempimento) può essere a sua volta del tipo a canale negativo (n-MOS), nei quali la corrente è costituita da un flusso di elettroni, oppure positivo (p-MOS) nei quali la corrente è determinata dal flusso di lacune.

Anche i transistori MOS possono essere utilizzati in una delle seguenti tre configurazioni circuiti-

tali:

- a sorgente comune;
- a derivatore comune;
- a porta comune.

La configurazione d'impiego più vantaggiosa e pertanto più utilizzata per il MOS è quella a sorgente comune.

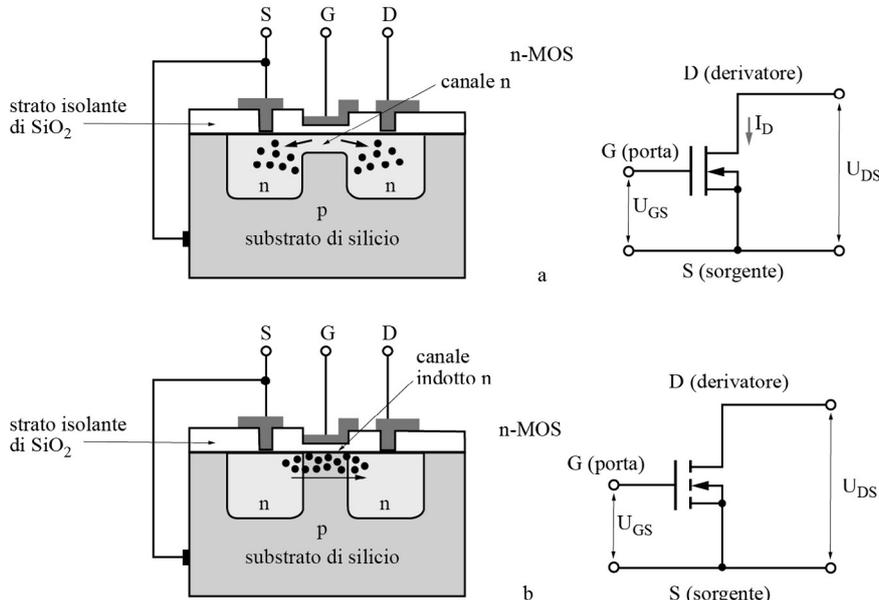


Figura 15.21 - Costituzione e segni grafici dei transistori MOS a svuotamento (a) e a riempimento (b) di tipo n .

15.8 - Tiristori (SCR)

I tiristori sono componenti a semiconduttori capaci di condurre la corrente in un solo senso e che possono essere portati istantaneamente in conduzione con l'applicazione, tramite un opportuno circuito d'innescio, di un impulso di tensione o di corrente ad un apposito elettrodo di controllo.

I tiristori o SCR (Silicon Controlled Rectifiers) sono componenti a semiconduttore, comparsi sul mercato verso la fine degli anni 1950, costituiti da una struttura di silicio a quattro strati di semiconduttore $pnpn$, a cui corrispondono, come schematizzato in figura 15.22 tre diverse giunzioni: pn , np e pn .

I tiristori, come i normali diodi, lasciano circolare la corrente in un solo senso (durante una sola semionda nei caso della corrente alternata); si differenziano però dai diodi in quanto la loro conduzione inizia solo dopo che sono stati innescati.

Applicando alla porta G un impulso positivo di ampiezza e durata adeguati, è possibile portare rapidamente in conduzione il tiristore.

In caso di assenza dell'impulso d'innescio, il dispositivo può passare in conduzione solo se la tensione applicata tra anodo e catodo supera una determinata soglia (U_{BO}). L'andamento della corrente è rappresentato dalla curva relativa a $I_G = 0$ del diagramma di figura 15.23.

Con valori crescenti dell'impulso di corrente I_G la tensione alla quale il tiristore entra in condu-

zione diminuisce come indicato dalle altre due curve della stessa figura ($I_{G2} > I_{G1}$). In ogni caso, una volta innescato, il tiristore presenta una caratteristica, del tutto analoga a quella di un normale diodo.

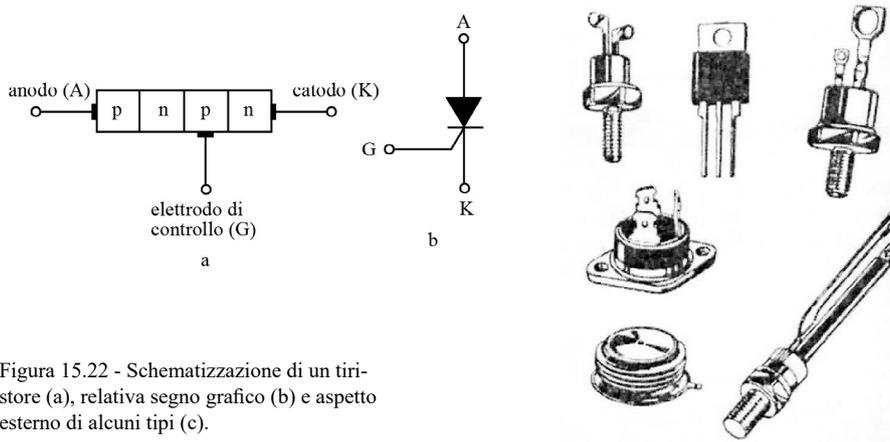


Figura 15.22 - Schematizzazione di un tiristore (a), relativo segno grafico (b) e aspetto esterno di alcuni tipi (c).

Il metodo d'innescò descritto è quello più comunemente usato.

L'impulso di corrente richiesto per il comando di un tiristore risulta tipicamente sempre inferiore all'1% della corrente nominale del dispositivo e non deve inoltre superare un determinato valore che dipende dal tipo di SCR.

I tiristori possono essere usati sia nei circuiti a corrente alternata sia in quelli in corrente continua.

Nei primi, la corrente si interrompe automaticamente ad ogni passaggio per lo zero della tensione e quindi, per mantenere il tiristore in conduzione, è necessario applicare un impulso di comando per ogni semiperiodo di conduzione.

Nei circuiti in corrente continua il tiristore, una volta innescato rimane in conduzione finché non viene interdetto mediante l'interruzione del circuito di carico oppure mediante la diminuzione della corrente che percorre il carico stesso al di sotto di un determinato valore detto di mantenimento.

I tiristori di potenza vengono utilizzati in particolare nei:

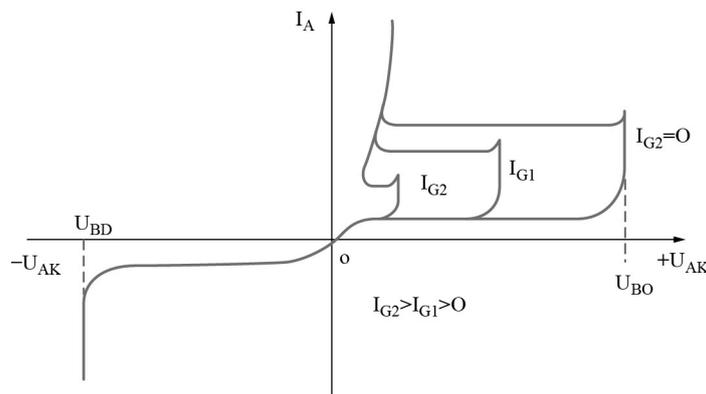


Figura 15.23 - Caratteristica voltamperometrica di un tiristore. Il tiristore è portato in conduzione con valore di tensione diretta U_{AK} tanto più bassa quanto più elevata è l'intensità della corrente impulsiva I_G applicata all'elettrodo G. Senza impulso d'innescò il tiristore entra in conduzione per un valore di $U_{AK} = U_{GO}$

- dispositivi raddrizzatori ovvero per la conversione di una corrente alternata in una corrente continua;
- dispositivi invertitori (inverters) ovvero per la conversione di una corrente continua in una corrente alternata.

15.9 - Triacs

I triacs sono componenti elettronici a semiconduttori capaci di condurre la corrente in entrambi i sensi; come i tiristori possono essere portati istantaneamente in conduzione con l'applicazione di un apposito impulso di corrente ad un elettrodo di controllo.

Il triac è un componente a semiconduttore caratterizzato da tre elettrodi, due terminali ed un elettrodo di controllo, che consente il passaggio di corrente in entrambe le direzioni. Analogamente ai tiristori, i triacs possono essere portati in conduzione in due modi:

- applicando una tensione corrispondente a quella di rottura U_{BO} ;
- applicando all'elettrodo di controllo (gate) un opportuno impulso di tensione.

Il funzionamento di un triac si avvicina a quello di due tiristori collegati in antiparallelo (Figura 15.24).

Il dispositivo presenta un solo elettrodo di controllo e due terminali T_1 e T_2 ognuno dei quali può essere considerato anodo o catodo a seconda del senso della corrente.

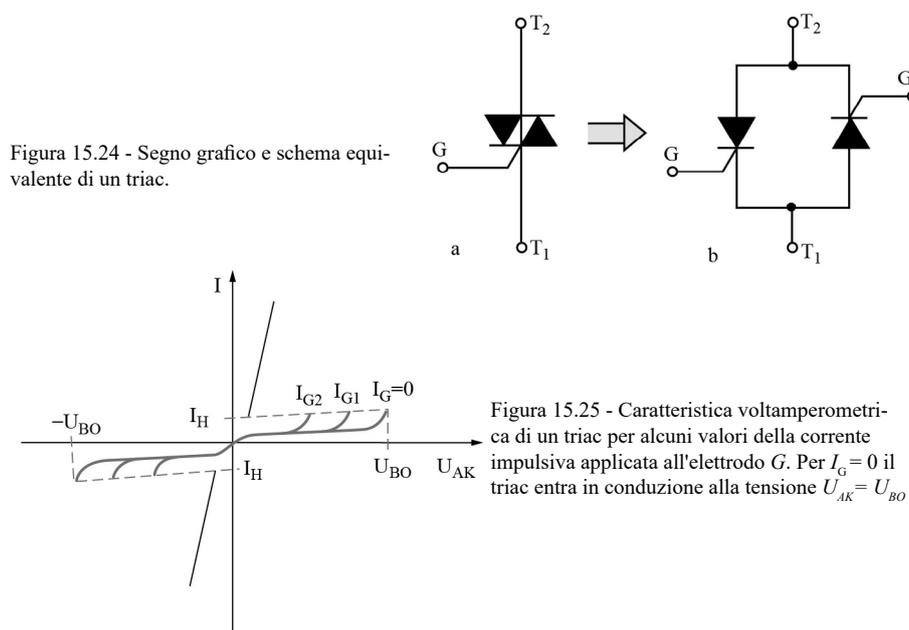
Le caratteristiche voltamperometriche di funzionamento di un triac sono molto simili a quelle che si otterrebbero sovrapponendo le caratteristiche di due SCR collegati in parallelo.

Nella figura 15.25 è riportata la caratteristica tipica di un triac ottenuta variando tensione di alimentazione U_{AK} prima in un senso e poi nell'altro, con circuiti di controllo aperto. Si può osservare che il triac passa in conduzione (come il tiristore) quando la tensione supera in valore assoluto il valore di rottura U_{BO} e come la sua caratteristica voltamperometrica completa risulti molto simile alla combinazione di quelle di due SCR polarizzati in senso contrario.

Una volta innescato il triac resta in conduzione fino all'istante in cui la corrente del circuito principale resta al di sopra del valore I_H di mantenimento.

I triacs vengono utilizzati nei circuiti in corrente alternata come interruttori o come regolatori di potenza.

Nell'impiego come interruttori presentano, rispetto agli interruttori elettromeccanici, numerosi vantaggi tra i quali si ricordano:



- assenza di archi o sovratensioni all'atto dell'apertura;
- assenza di rimbalzi all'atto del passaggio in conduzione;
- tempi di funzionamento (tempi per il passaggio dallo stato di conduzione a quello di blocco e viceversa) molto bassi;
- elevato numero di commutazioni eseguibili.

Per quanto riguarda l'impiego come regolatori di potenza, le tecniche di regolazione sono principalmente due:

- a variazione dell'angolo di conduzione del triac in ogni semiperiodo;
- a zero di tensione controllando cioè, il numero dei periodi in cui il triac conduce e in questo caso la potenza trasferita sul carico risulta proporzionale al rapporto tra il tempo t_{con} corrispondente al numero dei periodi in cui il triac conduce e l'intervallo di tempo totale t considerato.