

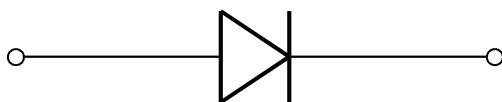
## CAPITOLO 6

### IL DIODO A SEMICONDUTTORE

Iniziamo adesso ad esaminare il primo dispositivo elettronico a semiconduttore: il diodo a giunzione  $p-n$ . Si tratta di un componente *non lineare*, in cui cioè la relazione tra tensione e corrente non è più di proporzionalità diretta. Il suo funzionamento si basa su quello di una giunzione  $p-n$  di silicio.

#### 6.1 Caratteristica del diodo a semiconduttore

Il comportamento delle giunzioni fra materiali semiconduttori di differenti caratteristiche di conducibilità riveste importanza fondamentale per lo studio dei dispositivi a semiconduttore. Il più semplice di tali dispositivi, il *diodo a giunzione  $p-n$* , è costituito da una barretta di semiconduttore di cui una parte è di tipo  $p$ , l'altra di tipo  $n$ ; agli estremi della barretta vengono saldati due contatti metallici, attraverso i quali il diodo può venire collegato ad un circuito esterno. In Fig. 6.1 è riportato il simbolo impiegato per rappresentare negli schemi elettrici il diodo a giunzione.



**Fig. 6.1** – Simbolo circuitale di un diodo a semiconduttore

Esaminando sperimentalmente la dipendenza tra la corrente  $I$  che scorre nel diodo e la tensione applicata  $V$ , si può ricavare per punti la *caratteristica* del diodo, che per un tipico diodo al silicio ha l'aspetto indicato in Fig. 6.2. Si vede da tale figura che nel caso di polarizzazione diretta, la corrente aumenta molto rapidamente con bassi valori di tensione applicata (*corrente diretta*) mentre nel tratto della caratteristica corrispondente alla polarizzazione inversa la *corrente inversa* è estremamente piccola (non rilevabile alla stessa scala usata per la corrente diretta) per un vasto campo di valori della *tensione inversa* applicata, fino ad arrivare ad una *tensione inversa di rottura* oltre la quale la corrente cresce rapidamente. Questo comportamento è prevedibile se si fa riferimento alla fisica delle

giunzioni  $p-n$  studiata nel capitolo precedente. Nel caso di polarizzazione diretta la corrente è grande perché dovuta alle abbondanti cariche maggioritarie delle due zone che si dirigono verso la giunzione e vengono spinte ad attraversarla. Ovviamente la tensione applicata deve essere sufficiente a superare la barriera di potenziale esistente: in pratica per valori di tensione maggiori di  $V_\gamma \approx 0,6$  V la barriera si è abbassata talmente che le cariche possono attraversare agevolmente la giunzione. Tale valore prende il nome di *tensione di soglia*. La polarizzazione inversa, invece, tende ad allontanare le cariche maggioritarie dalla giunzione ed in questo caso la corrente può essere dovuta soltanto alle cariche minoritarie, cioè alle poche lacune  $p$  presenti nella zona  $n$  ed agli elettroni  $n$  presenti nella zona  $p$ . La corrente che scorre nel diodo è pertanto la sola corrente inversa (data dalla somma della corrente di saturazione e della corrente di perdita superficiale).

Per polarizzazioni inverse ancora più elevate, il diodo diventa nuovamente conduttore, a causa dell'effetto valanga, descritto nel precedente capitolo.

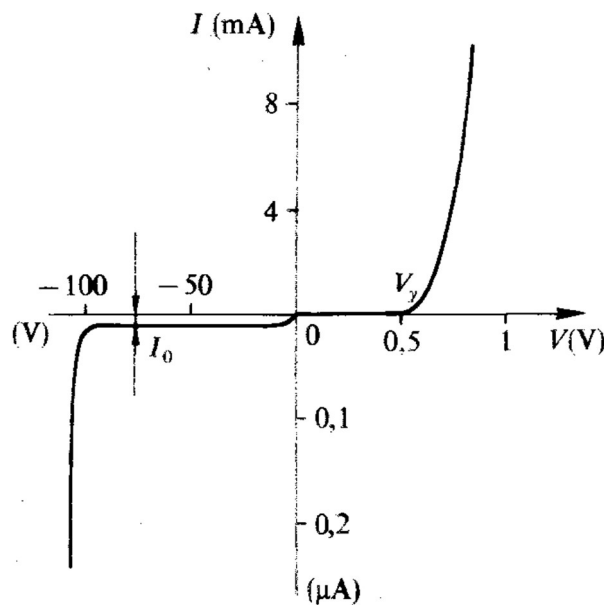


Fig. 6.2 – Caratteristica di un diodo al silicio

La caratteristica illustrata in figura si riferisce ad un generico diodo al silicio. Il tratto a destra della zona di rottura è descritto dalla relazione

$$I = I_S \left( e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right) \quad (6.1)$$

dove  $V_T$  è l'equivalente in tensione della temperatura e vale

$$V_T = kT/q = T/11600, \quad (6.2)$$

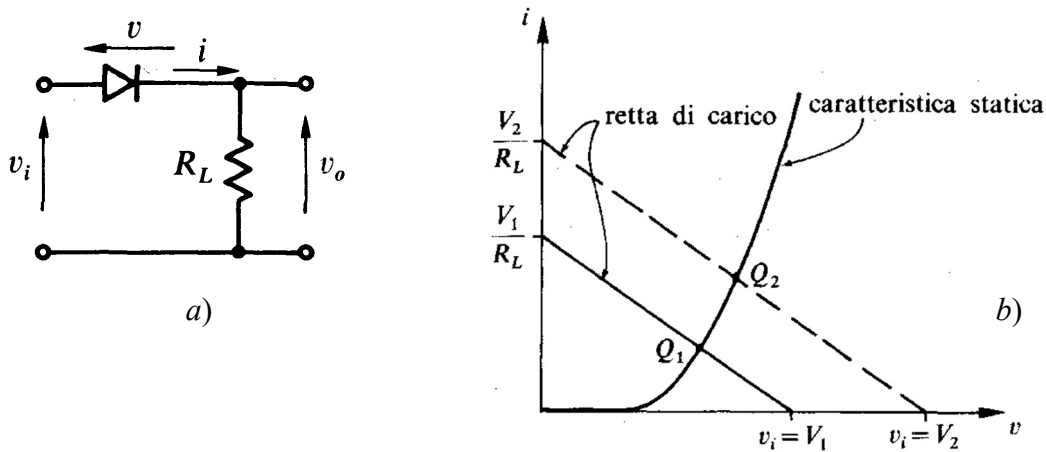
essendo  $k$  la costante di Boltzmann,  $T$  la temperatura assoluta,  $q$  la carica dell'elettrone e  $I_S$  la *corrente inversa di saturazione*, la quale è costante e presenta valori assai ridotti ( $< 10$  nA). A temperatura ambiente (300 K)  $V_T = 26$  mV;  $\eta$  è un *fattore d'idealità* che, per i diodi al silicio, vale 2 per bassi valori di corrente (in pratica per  $V < V_\gamma$ ) e 1 per elevate intensità di corrente.

**6.2 Il diodo come elemento circuitale**

Il circuito illustrato in Fig. 6.3a può essere descritto dalla relazione

$$v = v_i - R_L i \tag{6.3}$$

ovvero da una retta nel piano  $(v, i)$  con pendenza  $-1/R_L$ , che prende il nome di *retta di carico*. Essa è rappresentata in Fig. 6.3b insieme alla caratteristica del diodo. Il punto d'intersezione  $Q$  tra le due curve prende il nome di *punto di riposo* o *di lavoro*: esso fornisce i valori di tensione e di corrente per quel particolare diodo, in quel circuito, con quel valore di resistenza di carico  $R_L$  e con quella data tensione d'ingresso  $v_i$ .



**Fig. 6.3** – a) Circuito con diodo e resistenza. b) Punto di riposo del diodo

Se la tensione d'ingresso varia, la retta di carico trasla parallelamente a se stessa, visto che la pendenza dipende solo da  $R_L$  e il punto di riposo si muove sulla caratteristica del diodo sino ad incontrare il nuovo punto d'intersezione con la retta di carico traslata.

**6.3 Modelli del diodo**

Nel precedente paragrafo abbiamo visto come ricavare graficamente il punto di riposo del diodo, semplicemente come intersezione tra la retta di carico e la caratteristica del diodo. Se volessimo ripetere lo stesso calcolo analiticamente, il procedimento sarebbe un po' più lungo. Infatti, si dovrebbe svolgere il sistema di due equazioni formato dalle (6.1) e (6.3); il risultato fornirebbe i valori di  $v$ ,

tensione ai capi del diodo, e  $i$ , corrente che scorre in esso. Data la forma della (6.1), ciò significherebbe risolvere un'equazione trascendente. E tutto ciò solo con un diodo ed una resistenza! Immaginate cosa succederebbe se si complicasse soltanto un poco il circuito, aggiungendo magari un altro diodo e un'altra resistenza...

L'esempio sopra riportato ci fa capire quanto sia importante nella risoluzione dei problemi di elettronica, dapprima inquadrare il problema – ossia determinare il grado di precisione desiderato, considerare le tolleranze dei parametri circuitali – e, successivamente, applicare un modello fisico corrispondente. L'approccio, in fondo, è simile a quello di un geometra che dovendo calcolare la superficie circolare di una stanza si trova davanti al dilemma se utilizzare per il calcolo un valore del  $\pi$  troncato alla seconda cifra (3,14 per chi non lo ricordasse), oppure il valore letto sull'ultimo numero di “*Scientific American*” sul quale viene riportata con precisione l'ottocentesima cifra decimale. Ovviamente, questo non è un invito a eliminare le virgole dai calcoli, ma più che altro una sollecitazione a considerare, ogniqualvolta siete chiamati a risolvere un problema fisico, i “limiti” del problema stesso. Nei circuiti elettronici, la precisione con cui sono noti i parametri dei componenti circuitali è tale da potere considerare dei modelli semplificati per i componenti da utilizzare.

Anche nei casi in cui è richiesta una maggiore precisione, il ricorso ad un modello semplificato permette di effettuare uno studio *di prima approssimazione* che può servire da punto di partenza per uno studio successivo più approfondito. Si consideri d'altronde che anche la formula (6.1) prima citata, così come qualsiasi altra complicatissima formula relativa ad un fenomeno fisico, è sempre un “modello” di una legge fisica, che può essere ulteriormente complicato o affinato considerando ad esempio l'interazione con altri sistemi fisici.

Un'ultima precisazione sui modelli: stabilita la precisione di un problema, una volta note le tolleranze dei parametri in gioco, si valuti sempre il *campo d'applicabilità dei modelli*. Non tutti i modelli sono applicabili, qualunque sia l'escursione delle variabili indipendenti del problema. Facciamo un esempio semi-serio: su un'autorevole rivista di medicina è stato scritto che “il vino rosso fa bene perché contiene un'elevata quantità di anti-ossidanti, pertanto è consigliabile berne almeno una volta al giorno”. Se applicaste questo modello su di voi senza definirne i campi di applicazione - ossia il numero di bicchieri da bere per il quale il modello risulta ancora valido - vi accorgeteste, prima di entrare in coma etilico, che dopo 20 bicchieri il modello è uscito fuori dal suo campo di validità!

Ritornando ai diodi, un esempio più interessante (e senza rischio di lavanda gastrica) è quello della *linearizzazione* della caratteristica di un diodo al silicio. È allora utile introdurre il concetto di *resistenza dinamica* del diodo. Essa si definisce come la derivata della tensione rispetto alla corrente nell'intorno del punto di riposo del diodo in esame. Se si considerano piccole variazioni di tensioni

$\Delta V$  sulla caratteristica (e le corrispondenti variazioni di corrente  $\Delta I$ ) allora la resistenza dinamica  $R_f$  è circa uguale a  $\Delta V/\Delta I$ . La costruzione grafica è indicata in Fig. 6.4.

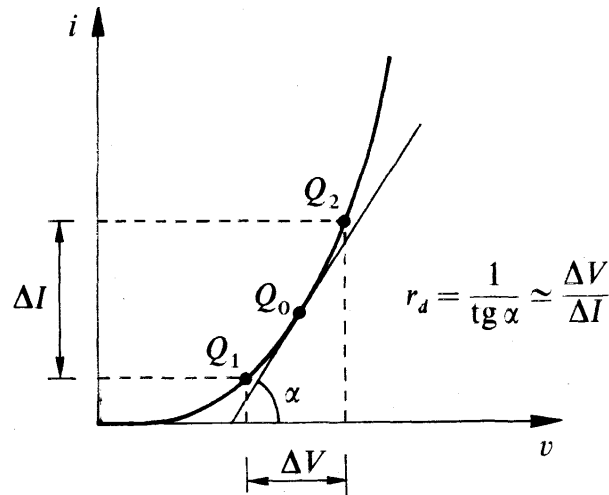


Fig. 6.4 – Determinazione grafica della resistenza dinamica

Il tratto della caratteristica per  $V > V_\gamma$  (cioè nell'intorno del punto di riposo) può essere sostituito da un tratto rettilineo la cui pendenza è proprio  $1/R_f$  (dato che la corrente cresce all'incirca linearmente con la tensione). Per  $V < V_\gamma$  la corrente inversa è estremamente debole, pertanto il diodo può essere pensato come un circuito aperto (resistenza dinamica inversa  $R_r = \infty$ ). La caratteristica così linearizzata è rappresentata in Fig. 6.5a. Si possono poi introdurre ulteriori approssimazioni, ad esempio trascurare la resistenza diretta della caratteristica che è sempre di valore ridotto ( $< 100 \Omega$ ) (cfr. Fig. 6.5b), o trascurare anche la tensione di soglia (cfr. Fig. 6.5c).

Quando  $V < V_\gamma$ , il diodo può essere rappresentato come un circuito aperto in tutti e tre i casi della Fig. 6.5. Invece, per  $V > V_\gamma$ , il diodo si può rappresentare tramite una sorgente di tensione  $V_\gamma$ , in serie ad una resistenza  $R_f$ , nel caso di Fig. 6.5a; come una semplice sorgente di tensione  $V_\gamma$ , nel caso di Fig. 6.5b; infine come un cortocircuito nel caso di Fig. 6.5c.

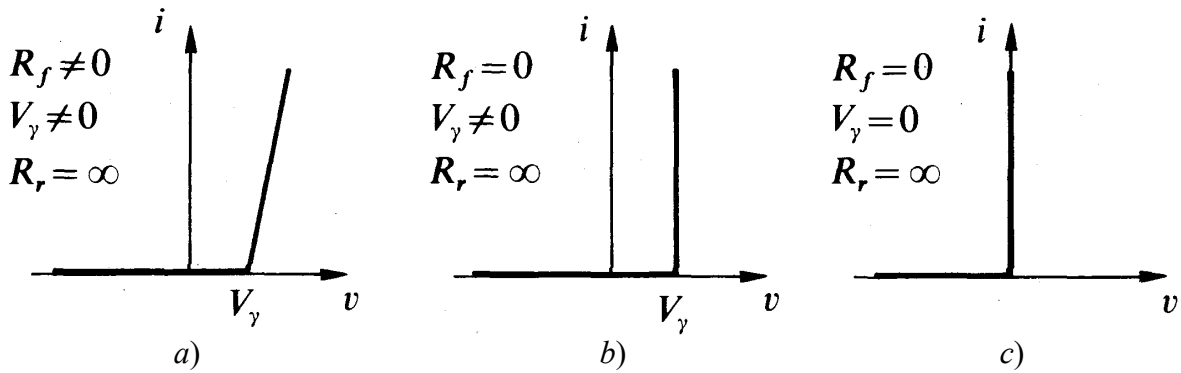


Fig. 6.5 – Modelli approssimati del diodo

Qual è il campo di applicabilità di questi modelli? In generale possiamo dire che essi saranno senz'altro validi per ampi segnali d'ingresso. Invece, il modello di Fig. 6.5c non è più correttamente applicabile se le tensioni d'ingresso sono comprese tra 0 e 0,6 V (applicando tale modello il diodo sarebbe in conduzione sebbene ciò sia palesemente falso). Anche per quanto concerne la corrente inversa, essa è trascurabile se – come, in genere, avviene – le correnti che scorrono nel circuito sono più elevate; diversamente se ne dovrà tenere conto e i modelli di Fig. 6.5 dovranno essere modificati.

6.4 Circuiti raddrizzatori

Si consideri il circuito in Fig. 6.6a e si supponga che  $v_i$  sia una tensione sinusoidale di ampiezza  $V_{iM}$  (Fig. 6.6b). Si osserva che:

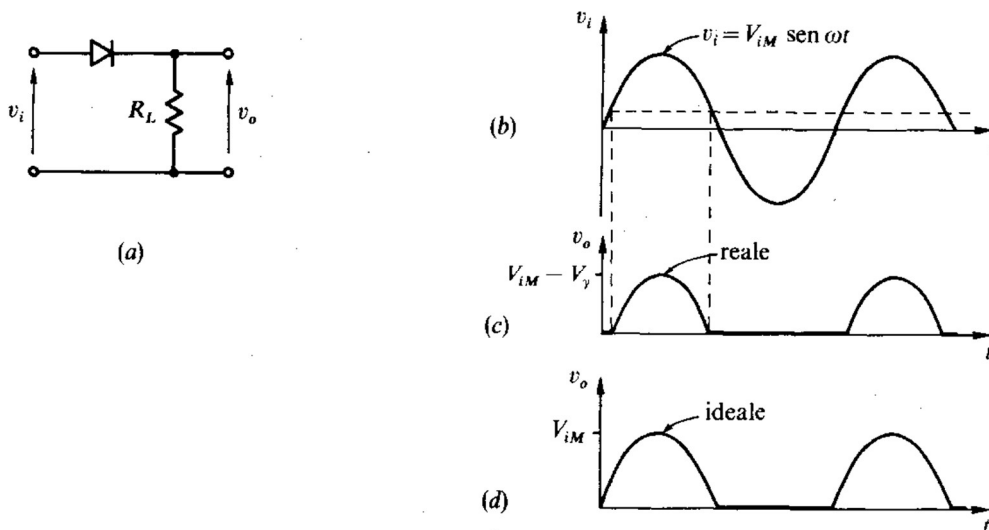


Fig. 6.6 – a) Circuito raddrizzatore con diodo; b) Andamento della tensione d'ingresso; c) Andamento della tensione d'uscita (diodo reale); d) (diodo ideale)

- per  $v_i > V_\gamma$ , il diodo è polarizzato direttamente (stato di *conduzione*) e pertanto la relazione tra ingresso e uscita risulta:

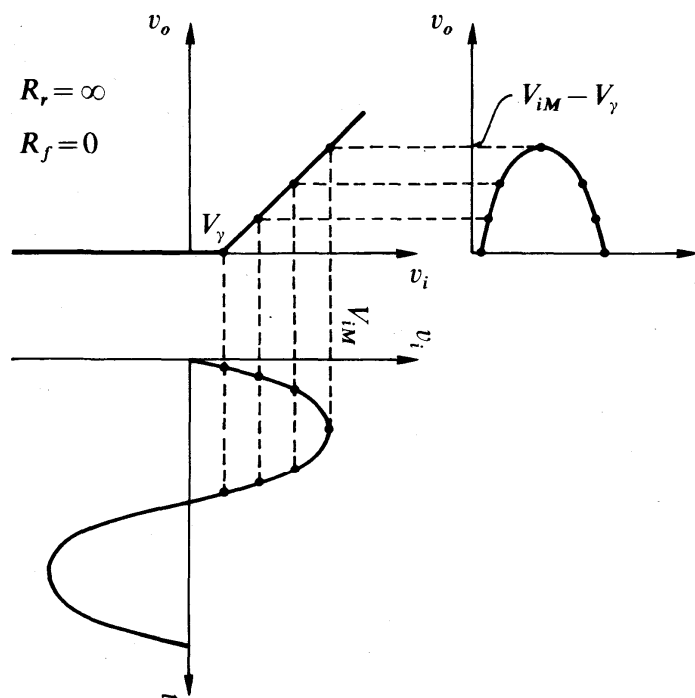
$$v_o = v_i - V_\gamma ; \quad (6.4)$$

- per  $v_i < V_\gamma$ , il diodo risulta polarizzato inversamente o, comunque, non conduce in modo apprezzabile (stato di *interdizione*); pertanto la relazione tra ingresso e uscita risulta:

$$v_o = 0 . \quad (6.5)$$

La forma d'onda d'uscita è rappresentata in Fig. 6.6c, avendo utilizzato il modello del diodo rappresentato in Fig. 6.5b. Si noti che tale modello è quasi sempre applicabile dato che  $R_f$  è dell'ordine delle poche decine di ohm, mentre  $R_L$  è di valore molto più elevato (altrimenti avremmo dovuto applicare il modello di Fig. 6.5a). Se le escursioni della tensione  $v_i$  sono molto più ampie di  $V_\gamma$ , possiamo anche applicare il modello del diodo ideale della Fig. 6.5c. In tal caso si ottiene in uscita la forma d'onda rappresentata in Fig. 6.6d.

Le equazioni (6.4) e (6.5) rappresentano la *transcaratteristica* del diodo, ossia le relazioni che legano la tensione d'ingresso con quella d'uscita. Saper ricavare la transcaratteristica di un circuito a diodo è molto importante perché essa consente, nota  $v_i$ , di ricavare immediatamente  $v_o$ . Ciò può essere fatto anche per via grafica seguendo il procedimento illustrato in Fig. 6.7: diagrammata la transcaratteristica del circuito sul piano  $v_i - v_o$ , si ottiene l'uscita  $v_o$  (in funzione del tempo  $t$ ) proiettando, istante per istante, i valori di  $v_i$  sulla transcaratteristica.



**Fig. 6.7** – Procedimento grafico per ricavare l'andamento della tensione d'uscita

L'applicazione più comune dei circuiti raddrizzatori è quella degli alimentatori, che esamineremo più avanti nel par. 6.8. Un alimentatore è un circuito elettronico che trasforma la *tensione di rete* (alternata) in una tensione continua di valore più basso. Un alimentatore pertanto consta, oltre che di un circuito raddrizzatore, anche di un opportuno trasformatore. Esaminiamo allora alcuni schemi di circuiti raddrizzatori (con trasformatore) adatti ad essere implementati in alimentatori.

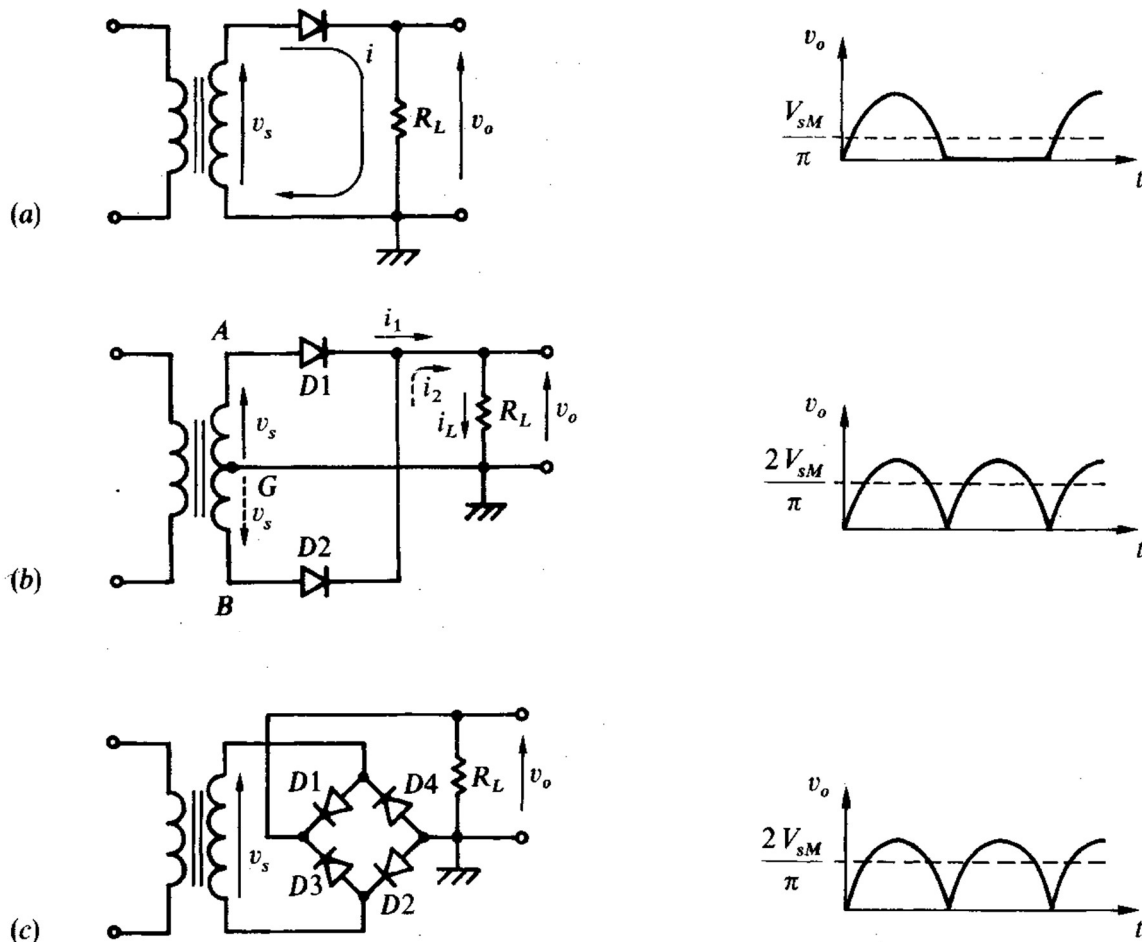


Fig. 6.8 – Raddrizzatori (e rispettive forme d'onda d'uscita):

a) ad una semionda; b) a doppia semionda; c) a ponte di Graetz

Il funzionamento del primo circuito (Fig. 6.8a) è stato già descritto precedentemente, con l'unica differenza che in questo circuito la tensione d'ingresso è costituita dalla tensione al secondario del trasformatore  $v_s$ . Il valore medio della tensione d'uscita risulta pari a  $V_{sM}/\pi$ .

Il secondo circuito (Fig. 6.8b) è un *raddrizzatore a doppia semionda*: esso richiede due diodi e un trasformatore a presa centrale in modo che la tensione ai capi del secondario venga ripartita esattamente (risulti, cioè:  $v_{AG} = v_{GB} = -v_{BG}$ ). Il diodo  $D_1$  conduce solo durante la semionda positiva di  $v_s$ , mentre  $D_2$  conduce solo durante la semionda negativa di  $v_s$ . Le correnti  $i_1$  e  $i_2$ , che scorrono



rispettivamente in  $D_1$  e  $D_2$ , percorrono il carico  $R_L$  *nello stesso verso*: pertanto la corrente  $i_L$  sul carico (essendo  $i_L = i_1 + i_2$ ) è tale da avere una tensione d'uscita sempre positiva ad ogni semiperiodo. Il valore medio della tensione d'uscita è ovviamente raddoppiato rispetto al caso precedente, risultando pari a  $2V_{SM}/\pi$ .

Il terzo circuito (Fig. 6.8c) è un *raddrizzatore (a doppia semionda) a ponte di Graetz*: a differenza del precedente non necessita di un trasformatore a presa centrale (ma fornisce sempre un'uscita identica a quella del circuito precedente). Durante il semiciclo positivo di  $v_s$ , la corrente scorre in  $D_1$ , prosegue su  $R_L$ , infine si chiude su  $D_2$  ( $D_3$  e  $D_4$  sono polarizzati inversamente). Durante il semiciclo negativo di  $v_s$ , la corrente scorre in  $D_3$ , prosegue su  $R_L$ , infine si chiude su  $D_4$  ( $D_1$  e  $D_2$  sono polarizzati inversamente). Il valore medio della tensione è ancora pari a  $2V_{SM}/\pi$ .

Altre considerazioni su questi circuiti verranno riportate nel par. 6.8.

## 6.5 Circuiti limitatori

I *circuiti limitatori (clipper)* vengono utilizzati quando si vuole selezionare, di una certa forma d'onda, solo le parti che si trovano al di sotto o al di sopra di una determinata *tensione di riferimento*, o che sono comprese fra due determinati valori di riferimento. Da questa definizione è evidente che i circuiti raddrizzatori costituiscono un sottoinsieme di quelli limitatori: infatti un circuito raddrizzatore fa passare solo quella porzione di forma d'onda che risulta maggiore di una tensione di riferimento pari a zero.

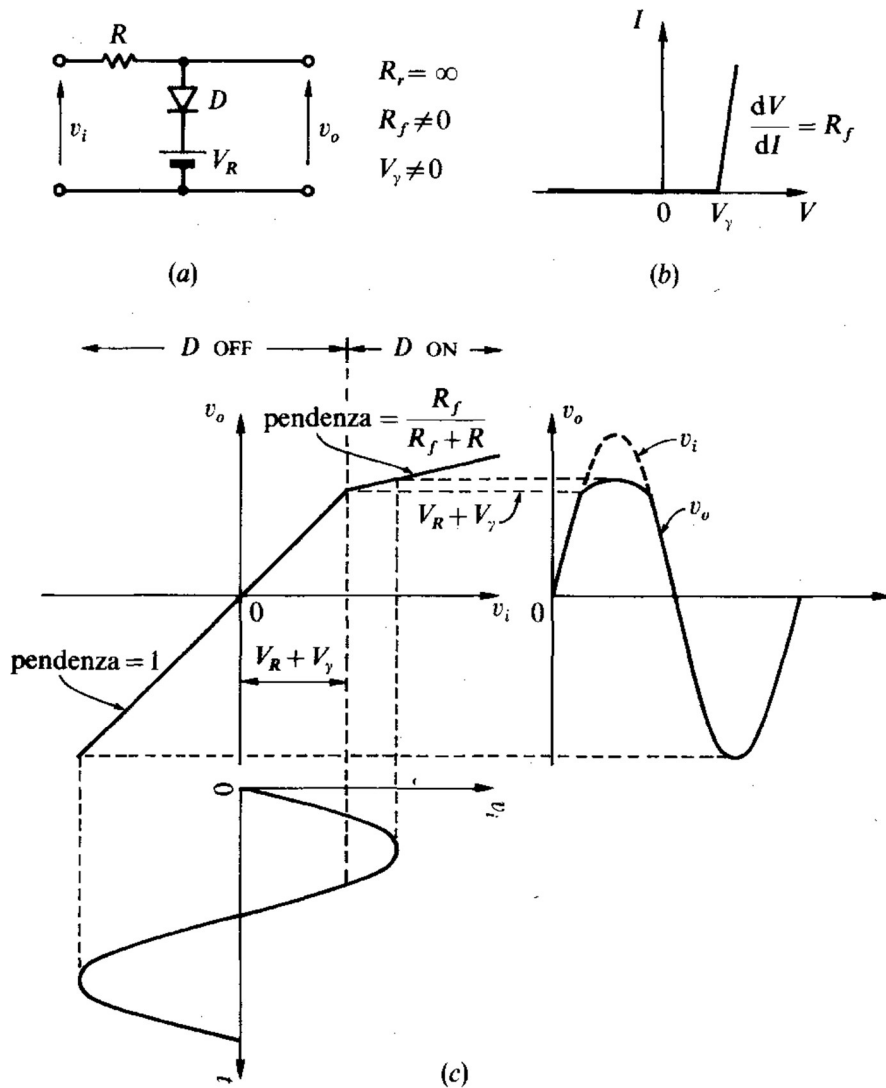
Analizziamo adesso il funzionamento del circuito limitatore riportato in Fig. 6.9a. Per il diodo si assume la caratteristica riportata in Fig. 6.9b.

- Per  $v_i < V_R + V_\gamma$  il diodo è polarizzato inversamente, o comunque non conduce in modo apprezzabile, e si comporta da circuito aperto; pertanto  $v_o$  segue l'andamento di  $v_i$ , dal momento che non si ha alcun carico che assorba corrente (in altre parole su  $R$  non può scorrere corrente dato che il circuito non si “chiude” da nessuna parte).
- Per  $v_i > V_R + V_\gamma$  il diodo è polarizzato direttamente e la tensione ai suoi capi è  $V_\gamma$  se si considera  $R_f = 0$ . Applicando invece il modello di Fig. 6.9b (con  $R_f \neq 0$ ), la tensione d'uscita si calcola pari a

$$v_o = V_R + V_\gamma + (v_i - V_\gamma - V_R) \frac{R_f}{R + R_f} . \quad (6.6)$$

La transcaratteristica pertanto è formata da due tratti rettilinei: uno è la bisettrice del primo e del terzo quadrante (cioè  $v_o = v_i$ ) per  $v_i < V_R + V_\gamma$ , l'altro è la retta di coefficiente angolare  $R_f/(R + R_f)$

descritta dalla (6.6) per  $v_i > V_R + V_\gamma$ . La costruzione grafica della tensione d'uscita è riportata in Fig. 6.9c.



**Fig. 6.9** – a) Circuito limitatore. b) Caratteristica del diodo.  
c) Transcaratteristica e procedimento grafico per il calcolo di  $v_o$

La pendenza non nulla del secondo tratto di caratteristica ( $v_i > V_R + V_\gamma$ ) produce una lieve ondulazione nel valore massimo di  $v_o$ . Se  $R_f$  fosse nulla, allora l'uscita sarebbe costante e pari a  $V_R + V_\gamma$ . Tuttavia nella quasi totalità dei casi, la resistenza diretta del diodo  $R_f$  è sempre molto più piccola della resistenza  $R$ , per cui il secondo tratto di caratteristica può essere quasi sempre approssimato come

$$v_o = V_R + V_\gamma. \tag{6.7}$$

Attenzione! Dato che la resistenza  $R$  serve semplicemente a “polarizzare” il diodo, si potrebbe essere tentati di sceglierla indefinitamente grande in modo da rendere sempre più trascurabile la

resistenza  $R_f$ . Ciò va bene sino a quando la  $R$  non divenga tanto grande da essere confrontabile con la resistenza inversa del diodo, che normalmente è dell'ordine delle decine di  $M\Omega$ . In questo caso, non è più possibile modellizzare il diodo in polarizzazione inversa come un circuito aperto, ma si deve considerare piuttosto come una resistenza elevata, oppure come un generatore di corrente che eroga una corrente pari a quella inversa. Anche qui, pertanto, è sempre opportuno chiedersi quale sia il campo di validità del modello del diodo prescelto.

Le configurazioni dei circuiti limitatori sono numerose e varie. In Fig. 6.10 sono riportati alcuni circuiti limitatori con le rispettive forme d'onda d'uscita (a tratto pieno), ottenute considerando tensioni d'ingresso (a linea tratteggiata) sinusoidali e diodi ideali.

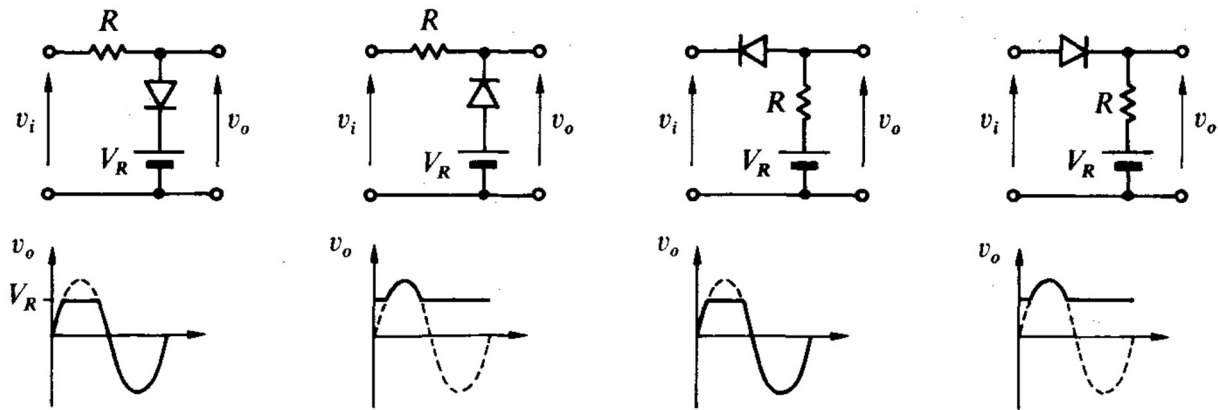


Fig. 6.10 – Circuiti limitatori e forme d'onda relative

Combinando opportunamente due limitatori si possono ottenere circuiti *slicer* per “tagliare” la forma d'onda d'ingresso a due livelli di tensione, come nell'esempio di Fig. 6.11.

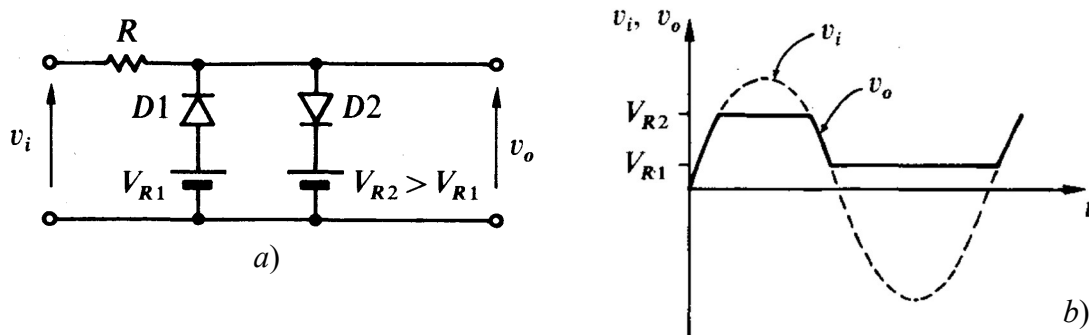
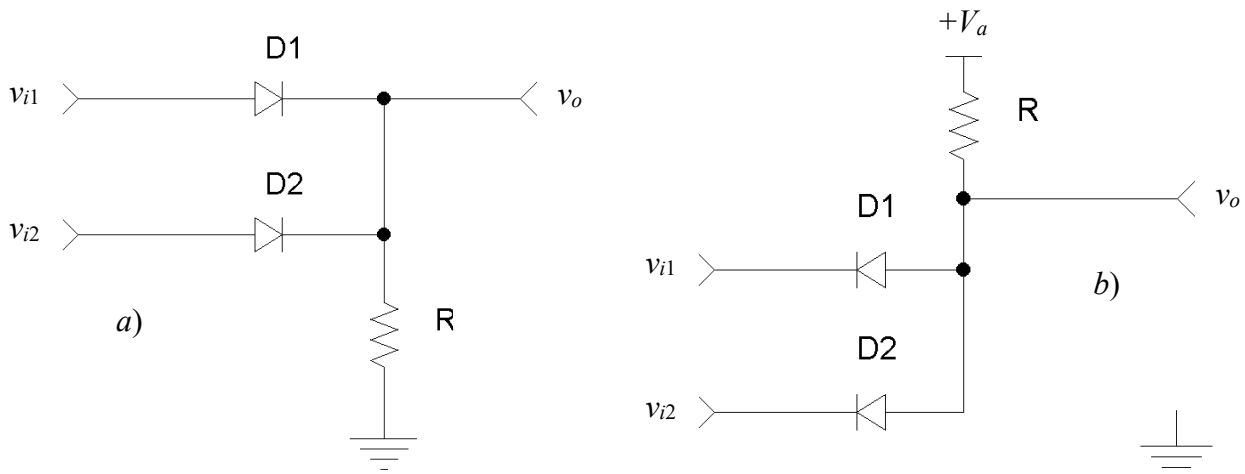


Fig. 6.11 – Circuito limitatore a due livelli e forme d'onda relative

### 6.6 Circuiti logici a diodi

I diodi agiscono come interruttori elettronici, dato che permettono alla corrente di fluire in una direzione e non nell'altra, in base alla tensione ad essi applicata. Questa proprietà può essere sfruttata per realizzare *circuiti logici a diodi*. La logica a diodi (talvolta anche indicata come logica diodo-resistenza) ha il vantaggio della semplicità, sebbene risenta della mancanza di uno stadio di amplificazione non essendo presente alcun elemento attivo che possa rigenerare il segnale. Inoltre, utilizzando solo diodi e resistenze, non tutte le funzioni logiche possono essere implementate ma soltanto le porte OR e AND. Gli schemi elettrici di queste ultime sono riportati in Fig. 6.12. In questi due circuiti in ingresso ed in uscita sono presenti soltanto due possibili livelli di tensione: o un livello basso (ad esempio, 0 V), oppure un livello alto (ad esempio, 5 V). La tensione di alimentazione  $+V_a$  è uguale al livello alto, mentre la massa è assimilabile ad un livello basso.



**Fig. 6.12** – Circuiti a) OR e b) AND a diodi

Nel circuito OR di Fig. 6.12a, i catodi dei diodi sono connessi all'uscita, la quale è a sua volta connessa a massa tramite la resistenza di pull-down  $R$ . Se su uno degli ingressi è presente il livello logico alto, il diodo relativo è polarizzato direttamente e pertanto è in conduzione: esso si comporta come un interruttore chiuso. Attraverso tale ramo, la corrente può pertanto fluire sulla resistenza  $R$ , generando una caduta di tensione, pari a quella della tensione d'ingresso, se si esclude la debole caduta di tensione sul diodo ( $\approx 0,6$  V). Gli altri diodi, connessi a tensioni d'ingresso a livello basso, sono polarizzati inversamente e pertanto interdetti: essi si comportano da circuiti aperti, in modo che gli ingressi relativi siano così sconnessi dall'uscita. Ciò ovviamente si verifica anche se tutti gli ingressi sono a livello basso: in tal caso, la corrente sulla resistenza è nulla e la tensione d'uscita è a livello basso.

Il circuito AND di Fig. 6.12b, presenta questa volta gli anodi dei diodi connessi all'uscita, la quale è a sua volta connessa all'alimentazione tramite la resistenza di pull-up  $R$ . Se su uno degli ingressi è presente il livello logico basso, il diodo relativo si comporta da interruttore chiuso (dato che sull'anodo è presente la tensione d'alimentazione e sul catodo quella d'ingresso a livello basso). L'uscita è allora connessa alla tensione d'ingresso a livello basso tramite il diodo (sommata ovviamente alla caduta di 0,6 V sul diodo) e pertanto è a livello basso anch'essa. Gli altri diodi, connessi a tensioni d'ingresso a livello alto, sono interdetti(\*) e si comportano da circuiti aperti, in modo che gli ingressi relativi siano così sconnessi dall'uscita. Se tutti gli ingressi sono a livello alto, tutti i diodi sono interdetti e la corrente fluisce dall'alimentazione a massa attraverso la resistenza portando la tensione d'uscita a livello alto.

Una tipica applicazione dell'OR a diodi è quella del *comparatore a finestra*: questa è una particolare configurazione di due amplificatori operazionali, usata spesso per confrontare due valori di tensione. Il comparatore a finestra segnala con un livello di tensione di uscita quando la tensione d'ingresso è compresa tra due valori di tensione prefissati. Lo schema elettrico del comparatore a finestra è rappresentato di seguito in Fig. 6.13.

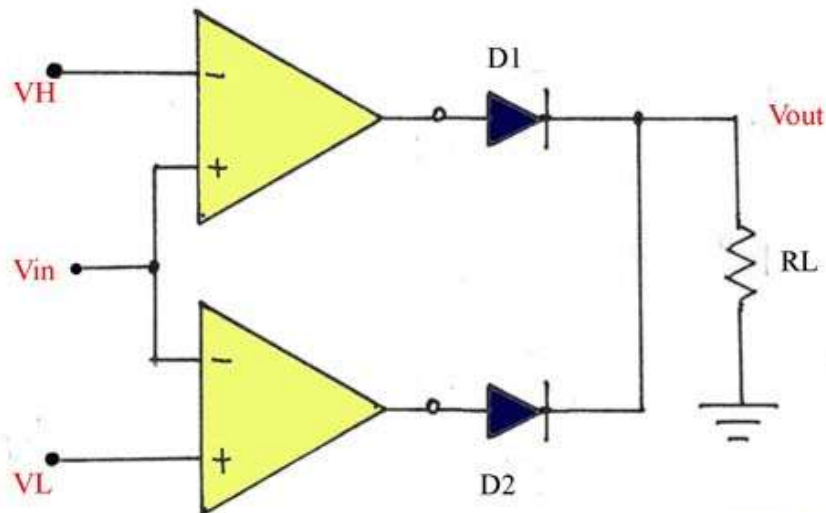


Fig. 6.13 – Comparatore a finestra

Il circuito si realizza inviando agli ingressi di un OR a diodi, le uscite di un comparatore invertente ed uno non invertente aventi tensioni di riferimento diverse. Le due tensioni di riferimento sono  $VH$  e  $VL$  mentre la tensione da confrontare è  $Vin$ ; l'uscita assumerà valore di tensione  $Vout$  con livello logico alto (H) o basso (L), secondo la seguente tabella:

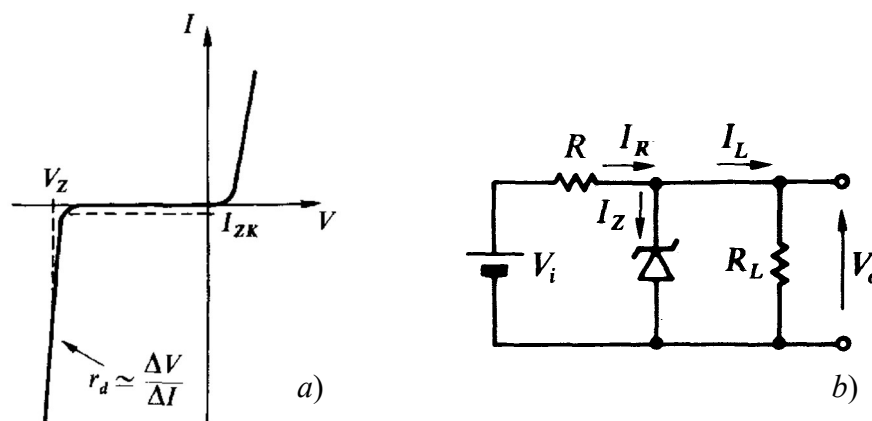
(\*) La tensione sul catodo è uguale a quella sull'anodo (entrambe a livello alto): in queste condizioni il diodo è interdetto poiché, per condurre, la tensione all'anodo deve essere superiore di quella al catodo di *almeno* 0,6 V circa.

$V_{in}$	$V_{out}$
$V_{in} < V_L$	H
$V_L < V_{in} < V_H$	L
$V_{in} > V_H$	H

Si può notare quindi che l'uscita  $V_{out}$  cambierà stato, passando da livello logico alto a livello logico basso, solo quando la tensione  $V_{in}$  sarà compresa tra i due valori di riferimento  $V_L$  e  $V_H$ .

### 6.7 Diodi Zener

Come detto in precedenza, i diodi funzionanti in zona di breakdown possono danneggiarsi irrimediabilmente. I *diodi Zener*, invece, vengono costruiti con caratteristiche di dissipazione termica adatte al funzionamento nella regione di breakdown. Costituiti da giunzioni  $p-n$  al silicio, essi sono caratterizzati da una tensione inversa di breakdown, detta *tensione di Zener*, particolarmente stabile e definita, in corrispondenza della quale la caratteristica tensione-corrente diventa quasi verticale. Per tale motivo, essi vengono utilizzati come *stabilizzatori*, o *regolatori di tensione*. Tali diodi sono fabbricati con drogaggi delle due zone  $p$  e  $n$  tali che la tensione di Zener (indicata spesso come  $V_Z$ ) risulta in genere compresa tra pochi volt e alcune decine di volt, dunque di valore più piccolo rispetto ai valori di breakdown dei normali diodi al silicio (che possono invece superare il centinaio di volt). I valori di massima potenza dissipabile variano tra qualche decimo e qualche decina di watt, alla normale temperatura di funzionamento.



**Fig. 6.14** – a) Caratteristica di un diodo Zener. b) Stabilizzatore di tensione con Zener

In Fig. 6.14 è illustrata la caratteristica  $I-V$  di un diodo Zener, accanto ad una tipica struttura in cui lo Zener, polarizzato *inversamente*, funziona come stabilizzatore della tensione d'uscita  $V_o$  contro *variazioni del carico* e della *tensione d'ingresso*  $V_i$ . Notate il simbolo circuitale dello Zener, in cui il terminale negativo riproduce in modo stilizzato la “Z” di “Zener”. Il problema della stabilizzazione

della tensione d'uscita di un circuito (a causa di variazioni dell'ingresso o del carico) è molto meno "astratto" di quanto non si possa pensare. Le tensioni di alimentazione, infatti, anche se "raddrizzate" con un opportuno circuito a diodi (cfr. par. 6.4) e livellate con opportuni filtri, non sono mai perfettamente costanti ma oscillano attorno ad un valore medio; inoltre, effetti spuri come interferenze radio o rumore "elettronico" possono corrompere il valore di una tensione. Per ciò che concerne il carico, si deve considerare che questi non è sempre costituito da una semplice resistenza (il cui valore può comunque variare con la temperatura), ma esso può costituire l'impedenza d'ingresso di un ulteriore circuito connesso in sequenza. Pertanto, esso può variare anche rapidamente nel tempo, secondo le tensioni e le correnti che operano in quel circuito.

Tornando al circuito di Fig. 6.14, supponiamo che si voglia stabilizzare la tensione d'uscita  $V_o$  ad un valore costante  $V_X$ . Si deve allora scegliere un diodo Zener con tensione di Zener pari  $V_Z = V_X$ . Bisogna pertanto dimensionare la resistenza  $R$ , detta *resistenza di polarizzazione* dello Zener, in modo che il diodo sia portato a lavorare, in polarizzazione inversa, nel tratto quasi verticale della curva, dove la resistenza dinamica  $r_d \approx \Delta V / \Delta I$  assume valori assai ridotti (dell'ordine di pochi ohm), quindi l'effetto stabilizzante risulta più preciso (normalmente il costruttore fornisce un valore "consigliato" di funzionamento). Supponendo di avere variazioni di tensioni d'ingresso  $V_i$  (e che  $R_L$  sia invece costante), un aumento di  $V_i$  provoca un aumento di  $I_R$  e quindi di  $I_Z$ , mentre una diminuzione di  $V_i$  provoca una diminuzione di  $I_Z$ . Se però tale corrente si trova sempre all'interno del tratto verticale della caratteristica dello Zener, la tensione ai capi dello Zener non varia sostanzialmente; allo stesso modo, anche la tensione  $V_o$  non varia, essendo la stessa imposta dallo Zener. Analogamente, mantenendo questa volta costante  $V_i$ , al variare del carico  $R_L$  e quindi della corrente assorbita, varia  $I_Z$  ma rimane pressoché costante  $V_o$  (e uguale alla tensione imposta dallo Zener). In altre parole, possiamo dire che lo Zener, se la corrente che in esso scorre è tale da farlo lavorare in zona di breakdown, si può considerare come un generatore di tensione costante di valore pari a  $V_Z$  (e con il terminale "+" posto sul catodo, anziché sull'anodo). Evidentemente, un modello di seconda approssimazione dello Zener deve anche considerare la lieve pendenza del tratto verticale della caratteristica aggiungendo, in serie alla batteria  $V_Z$ , una resistenza di valore pari alla resistenza dinamica  $r_d$ .

Come detto prima, la resistenza di polarizzazione  $R$  deve fissare la corrente di Zener in modo tale che il punto di riposo si trovi sul tratto verticale di breakdown. Basta dapprima calcolare la corrente che scorre sulla resistenza di polarizzazione dall'equazione alla maglia d'ingresso:

$$I_R = \frac{V_i - V_Z}{R} ; \quad (6.8)$$

poiché l'effetto della resistenza dinamica  $r_d$  dello Zener è normalmente molto piccolo, praticamente la tensione sul carico è

$$V_o = V_Z, \quad (6.9)$$

dunque la corrente sul carico vale:

$$I_L = \frac{V_Z}{R_L}. \quad (6.10)$$

Infine, dalla prima legge di Kirchoff si ricava la corrente sullo Zener:

$$I_Z = I_R - I_L. \quad (6.11)$$

La resistenza di polarizzazione si calcola pertanto dalla (6.8), combinandola con la (6.10) e (6.11), imponendo un opportuno valore per la corrente di Zener. Quest'ultima, affinché il punto di riposo si trovi in zona di breakdown (e quindi a  $V_Z$  costante), deve essere compresa tra  $I_{ZK}$  (cfr. Fig. 6.14a), detta *corrente di ginocchio*, sotto alla quale non si ha più regolazione, e la corrente  $I_{Zmax}$ , corrispondente alla massima potenza dissipabile dallo Zener.

Il funzionamento del diodo Zener è basato sull'effetto valanga, descritto nel par. 5.6 a proposito della regione di breakdown. In realtà, tale effetto si manifesta soltanto in quei diodi la cui tensione di Zener è all'incirca maggiore di 6 V. Per tensioni di Zener inferiori a tale valore, il breakdown è causato dall'*effetto Zener* propriamente detto: il drogaggio molto intenso comporta una giunzione molto stretta e un campo elettrico molto intenso che rompe numerosi legami covalenti provocando una considerevole corrente anche con tensioni esterne ridotte. Nonostante queste differenze, il termine "Zener" viene comunemente utilizzato per indicare diodi che funzionano in polarizzazione inversa anche per tensioni maggiori di 6 V. Si noti che il *coefficiente di temperatura*, ossia la variazione di  $V_Z$  per ogni grado di variazione di temperatura, è negativo per diodi basati su breakdown di tipo Zener, mentre risulta positivo per breakdown con effetto valanga.

Poiché i diodi Zener vengono utilizzati in polarizzazione inversa, è presente un effetto capacitivo associato alla zona di svuotamento in prossimità della giunzione. Tale capacità, che può assumere valori sino a qualche nF, limita il funzionamento alle alte frequenze, soprattutto nei diodi di elevata potenza.

Occorre infine osservare che, benché esistano diodi Zener con valori di  $V_Z$  inferiori a 2 V, questi ultimi hanno valori di resistenza dinamica  $r_d$  più elevati degli altri; pertanto si preferisce utilizzare diodi normali in polarizzazione diretta, anche ponendo più diodi in serie. Esistono combinazioni serie di diodi realizzate in unico contenitore con tensioni sino a 5 V.



## 6.8 Un applicazione dei diodi: gli alimentatori

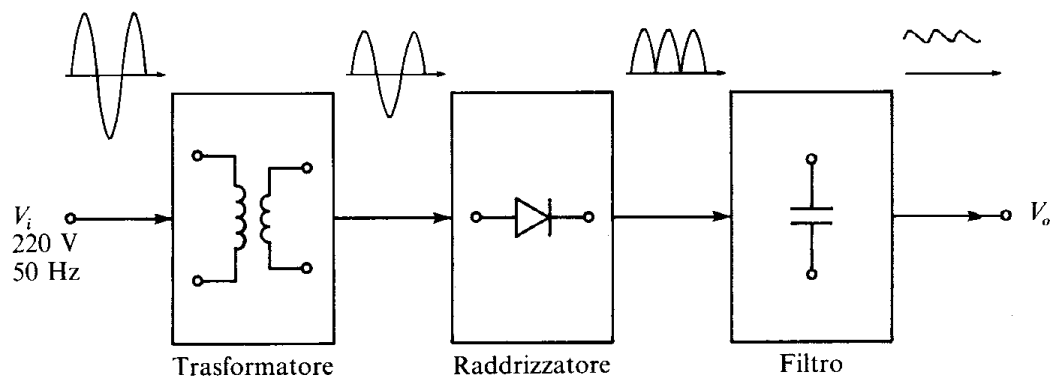
Per funzionare, la maggior parte dei dispositivi e dei circuiti elettronici richiede un'alimentazione in tensione continua, singola o duale. Le tensioni richieste sono normalmente comprese tra qualche volt e qualche decina di volt, con valori di corrente che possono andare da qualche mA alle decine di ampere.

Per questo scopo vengono comunemente impiegati *alimentatori e batterie*. Queste ultime sono però riservate essenzialmente alle apparecchiature portatili a causa della loro durata limitata e del costo relativamente elevato. Più frequentemente sono adoperati gli alimentatori (*power supply*), sistemi in grado di *convertire* (e ridurre) la tensione alternata di rete in tensione continua.

Esistono tre tipi di strutture di alimentatori: gli *alimentatori non stabilizzati* (*unregulated power supply*), gli *alimentatori stabilizzati* (*regulated power supply*) e gli *alimentatori a commutazione* o *switching* (*SMPS: switched mode power supply*). In questo paragrafo prenderemo rapidamente in esame i primi due.

### 6.8.1 Alimentatori non stabilizzati

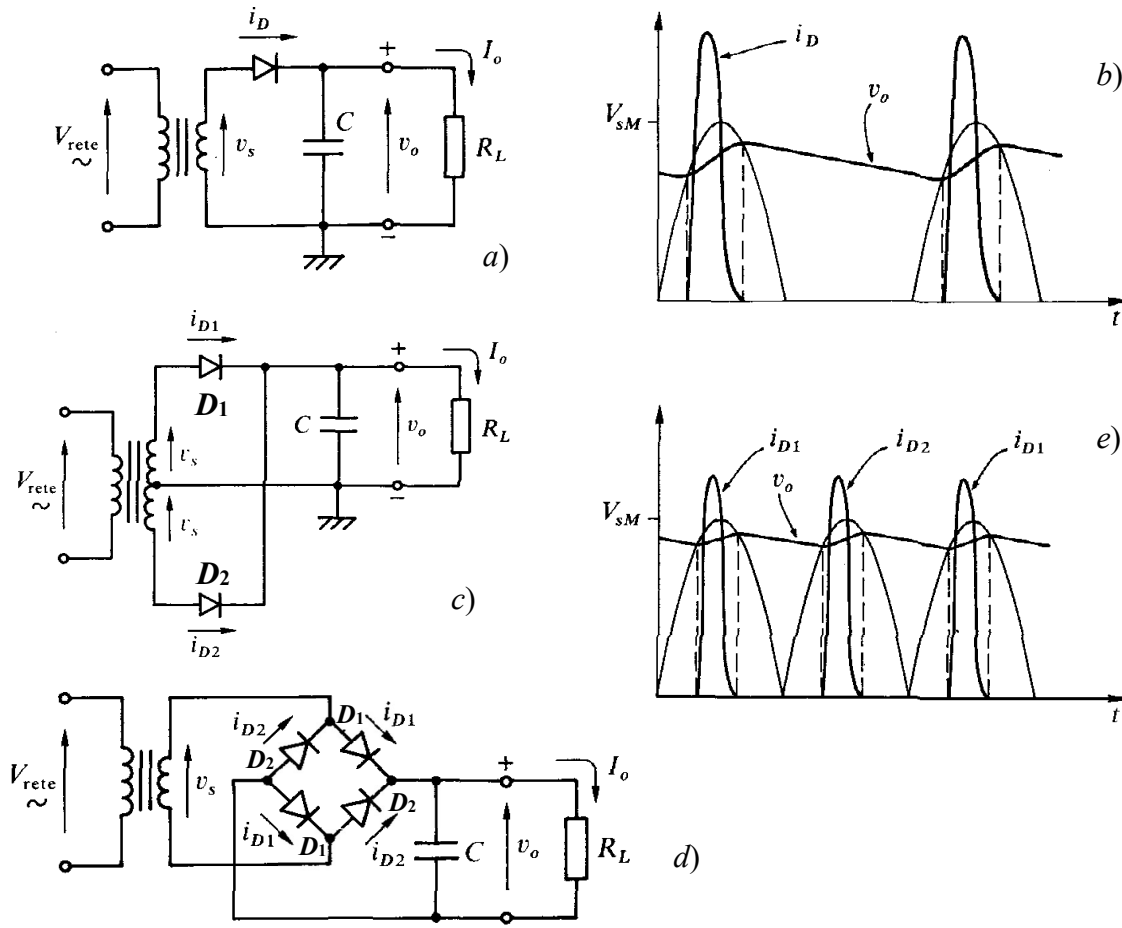
Per alcune applicazioni, ad esempio gli amplificatori finali audio, può essere sufficiente il cosiddetto *alimentatore non stabilizzato*, la cui struttura a blocchi è illustrata in Fig. 6.15.



**Fig. 6.15** – Schema a blocchi dell'alimentatore non stabilizzato

La tensione alternata di rete  $V_i$ , ridotta in ampiezza dal trasformatore, viene raddrizzata e successivamente filtrata in modo da alimentare un carico. Il residuo di alternata (*ripple*) in uscita è però elevato; inoltre la tensione di uscita  $V_o$  non è stabile nei confronti delle *variazioni della tensione di rete e del carico*.

Nella sua forma più comune l'alimentatore non stabilizzato è costituito da un trasformatore, da un raddrizzatore e da un filtro capacitivo. A seconda del tipo di raddrizzatore impiegato, si possono avere le tre configurazioni base illustrate in Fig. 6.16.



**Fig. 6.16** – a) Raddrizzatore ad una semionda. b) Forme d’onda relative al raddrizzatore ad una semionda. c) Raddrizzatore a doppia semionda a presa centrale. d) Raddrizzatore a doppia semionda a ponte. e) Forme d’onda relative al raddrizzatore a doppia semionda

Il raddrizzatore di Fig. 6.16a, *ad una semionda* viene usato quando sono richieste basse potenze e basse correnti di carico. Il diodo in ciascun periodo conduce solamente nel breve intervallo in cui la tensione al secondario  $v_s$  supera la tensione  $v_o$  sul condensatore. Per la rimanente parte del periodo il diodo è interdetto e la corrente viene fornita al carico dal condensatore stesso, che, scaricandosi, produce un’accentuata *ondulazione (ripple)* nella tensione di uscita. La carica del condensatore è rapida poiché la costante di tempo dipende dalla (bassa) resistenza del diodo in conduzione e del secondario del trasformatore, mentre la scarica, più lunga, dipende dalla resistenza di carico  $R_L$ .

In Fig. 6.16b è illustrato l’andamento della corrente nel diodo e della tensione d’uscita; con linea più sottile è inoltre indicata la tensione al secondario. Come si può notare, a causa della caduta di tensione sul diodo, la tensione d’uscita rimane sempre inferiore al valore di picco  $V_{sM}$  della tensione sul secondario.

Questo tipo di alimentatore, oltre ad un ripple elevato, presenta un forte picco della corrente  $i_D$ , che deve provvedere nel breve intervallo di conduzione del diodo alla ricarica del condensatore.

Viceversa nei raddrizzatori a doppia semionda, sia a presa centrale (Fig. 6.16c), che a ponte (Fig. 6.16d), la tensione  $v_s$  raddrizzata consente la ricarica del condensatore in ogni semiperiodo (Fig. 6.16e). L'ondulazione ed il picco di corrente nei diodi, a parità di corrente di uscita  $I_o$ , risultano così più contenuti rispetto al caso precedente.

I due raddrizzatori a doppia semionda si comportano però diversamente per quanto riguarda la massima tensione inversa PIV (*peak inverse voltage*) che i diodi devono sopportare. Nel raddrizzatore a presa centrale, come del resto in quello a semionda, ai capi del diodo interdetto si stabilisce una PIV che può calcolarsi semplicemente considerando la maglia comprendente i due diodi; se il diodo  $D_1$  è interdetto, il  $D_2$  risulta cortocircuitato, e quindi ai capi del diodo  $D_1$  la massima tensione inversa risulta  $2V_{SM}$  (stesso risultato si ottiene se si considera la maglia comprendente il diodo  $D_1$  e il carico, avendosi  $PIV = V_o - (-V_{SM}) \approx 2V_{SM}$ ). Viceversa nel raddrizzatore a ponte, nell'ipotesi che i diodi  $D_1$  siano interdetti, e che quindi i diodi  $D_2$  siano in conduzione, se si considera la maglia formata dal secondario del trasformatore e da due diodi  $D_1$  e  $D_2$ , si ottiene  $PIV = V_{SM}$ .

I raddrizzatori a ponte, pertanto, presentano il vantaggio di avere dei diodi che devono sopportare una massima tensione inversa pari alla metà rispetto alla PIV di quelli a presa centrale. Per tale motivo, il raddrizzatore a ponte è il più utilizzato negli alimentatori, sebbene impieghi un numero maggiore di diodi. In commercio esistono ponti assemblati in un unico contenitore plastico, adatti per una gran varietà di correnti e di tensioni.

Un'altra ragione per la quale i raddrizzatori a ponte risultano preferibili a quelli a presa centrale è che con essi possono facilmente realizzarsi *alimentatori duali*, che forniscono, cioè, tensioni simmetriche. Ciò è di grande utilità in molti dispositivi, come ad esempio, negli amplificatori operazionali. Lo schema di un alimentatore duale è riportato in Fig. 6.17.

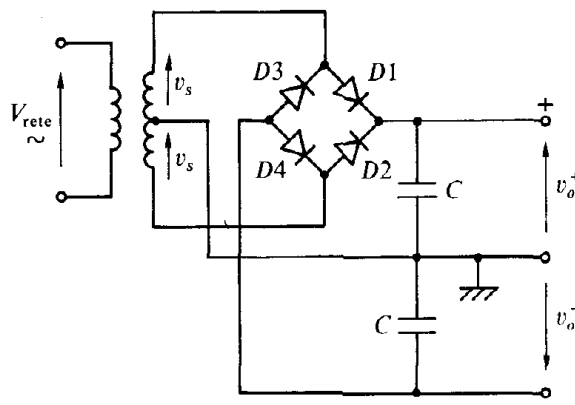


Fig. 6.17 – Alimentatore duale

Nella semionda positiva di  $v_s$  conducono  $D1$  per l'uscita positiva e  $D4$  per l'uscita negativa. Nella semionda negativa conducono rispettivamente  $D2$  e  $D3$ .

### 6.8.2 Alimentatori stabilizzati

Gli *alimentatori stabilizzati* si dividono in due categorie: *lineari* e *a commutazione*. Lo studio di quelli del secondo tipo verrà affrontato nel paragrafo successivo. La configurazione di un *alimentatore lineare* è tipicamente quella di Fig. 10.4, dove a valle di un alimentatore non stabilizzato viene posto un circuito *stabilizzatore* o *regolatore*. Questo dispositivo, tramite un anello di reazione negativa, “sente” la tensione di uscita, la confronta con una *tensione di riferimento* stabile e costante ed agisce su un elemento di controllo – spesso un transistor inserito in serie o in parallelo al carico – in modo da mantenere l'uscita stabile.

Il tipo più semplice di stabilizzatore di tensione è quello con diodo Zener, già analizzato nel par. 6.7 e illustrato in Fig. 6.14b. Questo tipo di regolatori sono anche detti di tipo *parallelo* o *shunt*, dato che in essi l'elemento di controllo (Zener) è posto direttamente in parallelo al carico. Un limite di tali regolatori è costituito dalla ridotta escursione che può avere la corrente d'uscita. Infatti, dal momento che la tensione sulla resistenza  $R$  di polarizzazione, e quindi la corrente  $I$  che scorre in essa, rimangono sostanzialmente costanti, riducendo la corrente sul carico  $I_L$  si aumenta della stessa quantità la corrente  $I_Z$  che attraversa lo Zener e viceversa. Nei diodi Zener però l'escursione di  $I_Z$  è piuttosto limitata (da qualche mA ad alcune decine di mA), sicché risulta limitato anche il campo di variazione di  $I_L$ .

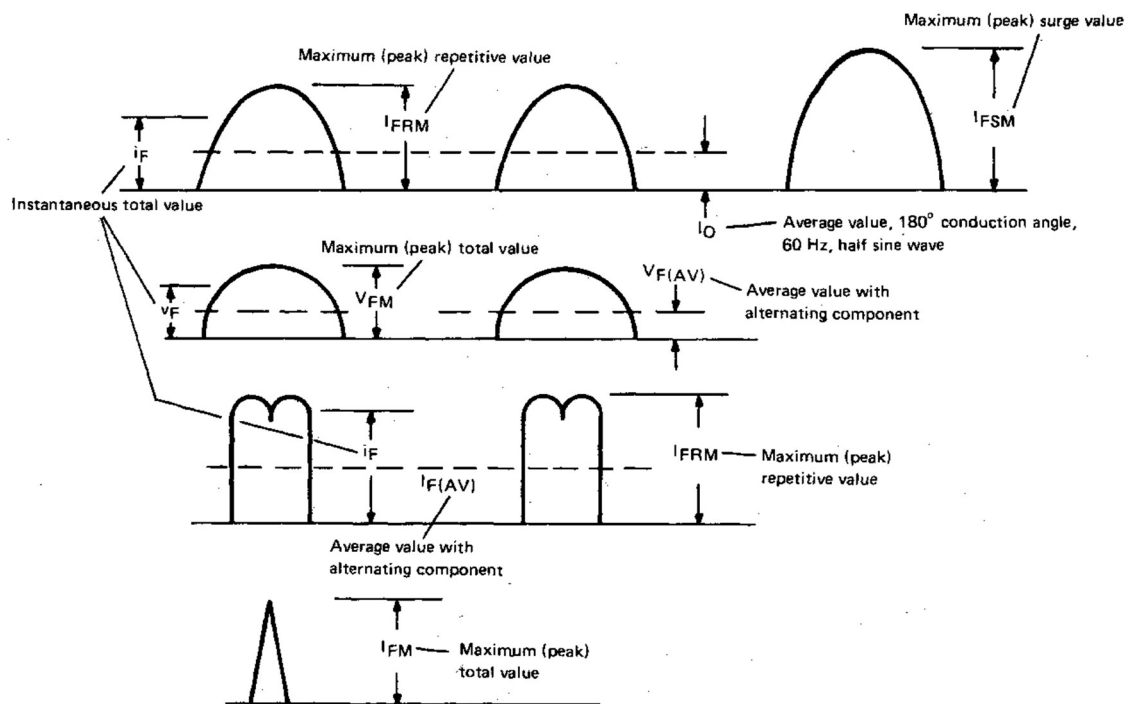
## 6.9 Fogli tecnici (data sheets) di diodi

Riferendoci in particolare ai diodi, diamo di seguito alcuni dei parametri più significativi, al fine di fornire un orientamento per la lettura e l'interpretazione dei manuali. Si noti che il simbolismo adottato dalle varie case è in generale standardizzato e che, comunque, il simbolismo stesso viene quasi sempre definito nelle pagine di informazione di ciascun manuale. Si noti, infine, che i *data sheets* di quasi tutti i dispositivi esistenti attualmente in commercio possono essere reperiti agevolmente su *internet*.

- *Polarizzazione diretta* (cfr. Fig. 6.18)

$I_{F(RMS)}$	Valore efficace totale della corrente
$I_F$	Corrente continua circolante nel diodo
$I_{F(AV)}$	Valore medio totale della corrente (a 50 Hz o 60 Hz)
$i_F$	Valore istantaneo totale della corrente
$I_{FM}$	Valore massimo (di picco a regime) totale della corrente
$I_{FRM}$	Valore di picco ripetitivo della corrente, comprese le correnti di transitorio

$I_{FSM}$	Valore massimo di picco non ripetitivo ( <i>surge</i> ) della corrente; sovracorrente di breve durata dovuta a guasti o situazioni impreviste; talvolta è specificata la durata massima tollerabile
$I_O$	Valore medio della corrente calcolato su un intero periodo della corrente tipica di un raddrizzatore a semionda
$V_{F(RMS)}$	Valore efficace totale della tensione
$V_F$	Tensione continua ai capi del diodo
$V_{F(AV)}$	Valore medio totale della tensione
$v_F$	Valore istantaneo totale della tensione
$V_{FRM}$	Valore di picco ripetitivo della tensione
$P_{F(AV)}$	Potenza media
$P_{FM}$	Potenza massima



**Fig. 6.18** – Diagrammi di correnti e tensioni del diodo polarizzato direttamente

- *Polarizzazione inversa* (cfr. Fig. 6.19)

$I_{R(RMS)}$	Valore efficace totale
$I_R$	Corrente continua
$I_{R(AV)}$	Valore medio totale
$i_R$	Valore istantaneo totale
$I_{RM}$	Valore massimo totale (di picco)
$I_{RRM}$	Valore di picco ripetitivo

$I_{RSM}$	Valore massimo di picco non ripetitivo
$V_{R(RMS)}$	Valore efficace totale
$V_R$	Tensione continua
$V_{R(AV)}$	Valore medio totale
$v_R$	Valore istantaneo totale
$V_{RM}$	Valore massimo totale (di picco)
$V_{RWM}$	Massima tensione istantanea di lavoro, escludendo ogni transitorio
$V_{RRM}$	Massima tensione di picco, compresi i transitori ripetitivi
$V_{RSM}$	Massima tensione di picco non ripetitiva (sovratensione non ripetitiva)
$V_{(BR)}$	Valore di tensione a cui si verifica il breakdown

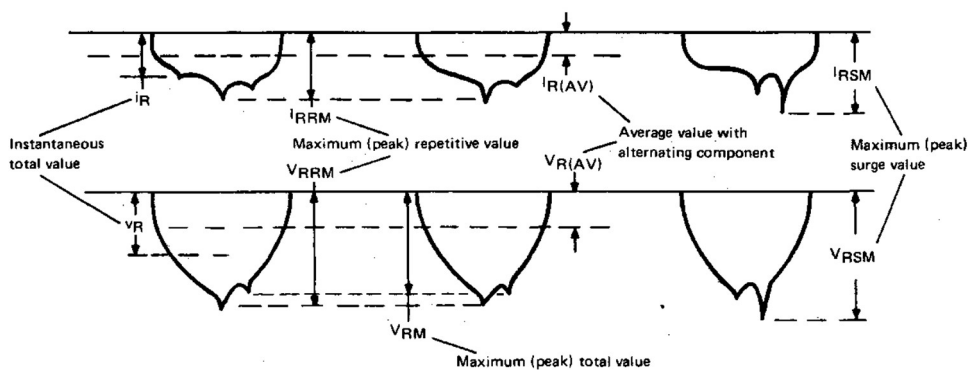


Fig. 6.19 – Diagrammi di correnti e tensioni del diodo polarizzato inversamente

• Altri parametri

$t_{rr}$	Tempo di recupero inverso
$T_A, T_J, T_C$	Temperatura ambiente, della giunzione, del contenitore

• Diodi Zener

$I_{ZK}$	Valore di corrente in prossimità del <i>ginocchio</i> della curva caratteristica; per valori minori la regolazione è nulla
$I_{ZM}$	Valore di corrente massimo compatibile con la massima potenza dissipabile
$V_{ZK}$	Valore di tensione relativo al <i>ginocchio</i> della curva caratteristica
$V_Z$	Tensione di Zener nominale
$V_{ZT} @ I_{ZT}$	Tensione inversa corrispondente alla corrente $I_{ZT}$ a cui è stato effettuato il test
$Z_{IZT}, r_{IZT}$	Impedenza o resistenza dinamica alla corrente di test
$P_T$	Massima potenza dissipabile (a 25°C)
$\alpha, T_C$	Coefficiente di temperatura, assoluto (mV/°C) o relativo (%/°C)