

CAPITOLO 5

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.

5.1 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. 5.1 è riportato il simbolo impiegato per rappresentare negli schemi elettrici il diodo a giunzione.

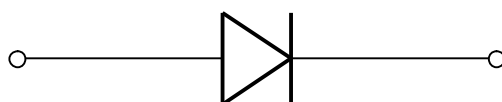


Fig. 5.1 – Simbolo circuitale di un diodo a semiconduttore

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. 5.2. 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 – cfr. par. 4.6).

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

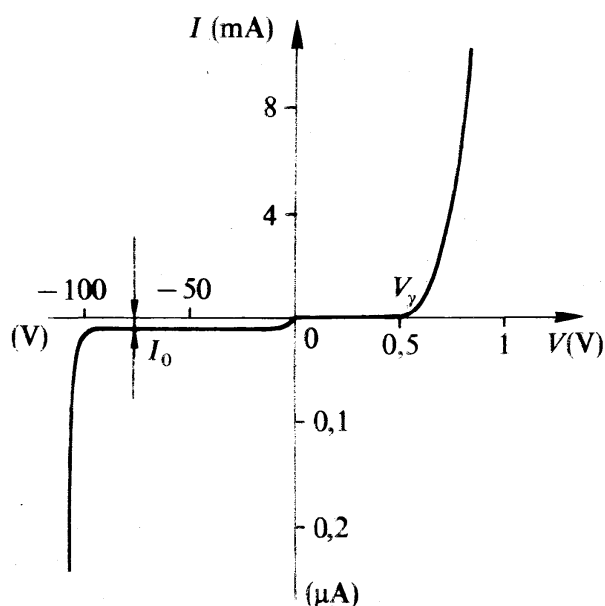


Fig. 5.2 – Caratteristica di un diodo al silicio

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

$$I = I_S \left(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right) \quad (5.1)$$

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

$$V_T = kT/q = T/11600, \quad (5.2)$$

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; η 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.

5.2 Il diodo come elemento circuitale

Il circuito illustrato in Fig. 5.3a può essere descritto dalla relazione

$$v = v_i - R_L i \quad (5.3)$$

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. 5.3b 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 .

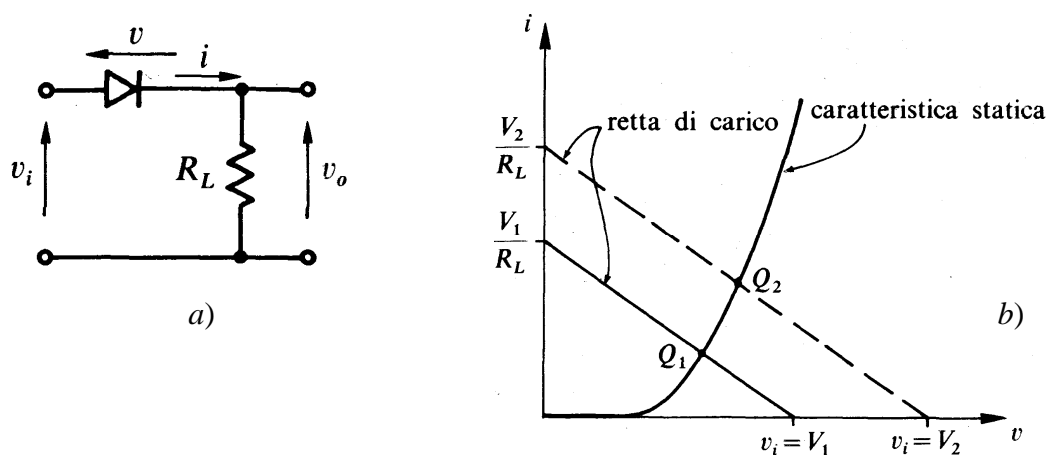


Fig. 5.3 – a) Circuito con diodo e resistenza. b) Punto di riposo del diodo

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.

5.3 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 (5.1) e (5.3); il risultato fornirebbe i valori di v , tensione ai capi del diodo, e i , corrente che scorre in esso. Data la forma della (5.1), 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, considerate 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 π 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 (5.1) 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 ΔV sulla caratteristica (e le corrispondenti variazioni di corrente ΔI) allora la resistenza dinamica R_f è circa uguale a $\Delta V/\Delta I$. La costruzione grafica è indicata in Fig. 5.4.

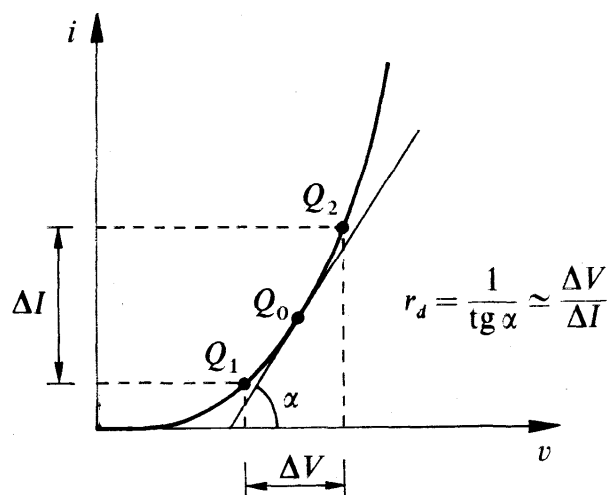


Fig. 5.4 – Determinazione grafica della resistenza dinamica

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. 5.5a. Si possono poi introdurre ulteriori approssimazioni, ad esempio trascurare la resistenza diretta della caratteristica che è sempre di valore ridotto ($< 100 \Omega$) (cfr. Fig. 5.5b), o trascurare anche la tensione di soglia (cfr. Fig. 5.5c).

Quando $V < V_\gamma$, il diodo può essere rappresentato circuitalmente come un circuito aperto in tutti e tre i casi della Fig. 5.5. Invece, per $V > V_\gamma$, il diodo si può rappresentare tramite una sorgente di tensione V_γ , in serie ad una resistenza R_f , nel caso di Fig. 5.5a; come una semplice sorgente di tensione V_γ , nel caso di Fig. 5.5b; infine come un cortocircuito nel caso di Fig. 5.5c.

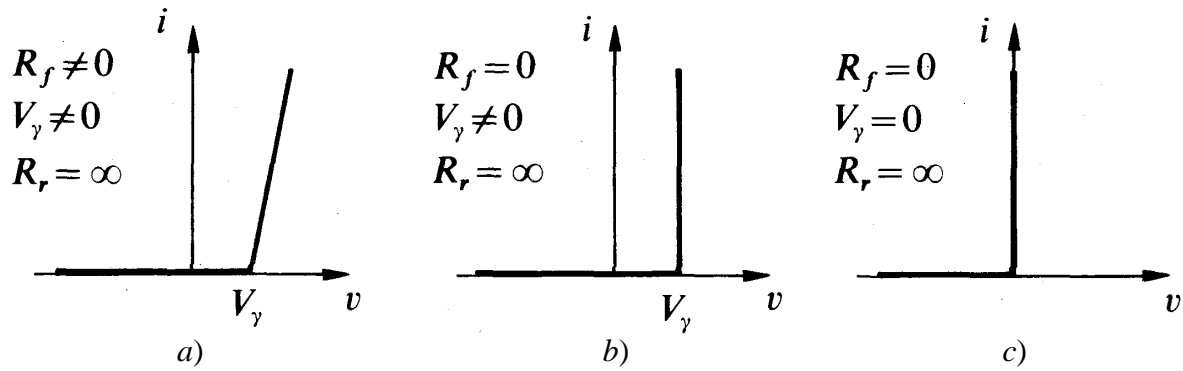


Fig. 5.5 – Modelli approssimati del diodo

Qual è il campo di applicabilità di questi modelli? In generale possiamo dire che essi saranno senz'altro validi per ampi segnali d'ingresso. Ad esempio il modello di Fig. 5.5c 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. 5.5 dovranno essere modificati.

5.4 Circuiti raddrizzatori

Si consideri il circuito in Fig. 5.6a e si supponga che v_i sia una tensione sinusoidale di ampiezza V_{iM} (Fig. 5.6b). Si osserva che:

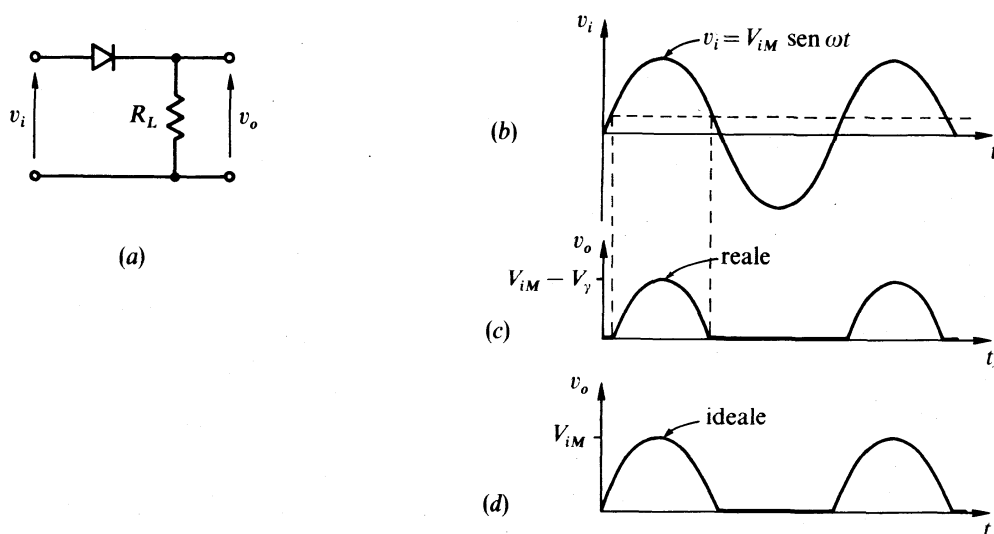


Fig. 5.6 – a) Circuito raddrizzatore con diodo; b) Andamento della tensione d'ingresso; c) Andamento della tensione d'uscita (diodo reale); d) (diodo ideale)

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

$$v_o = v_i - V_\gamma ; \quad (5.4)$$

- 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:

$$v_o = 0 . \quad (5.5)$$

La forma d'onda d'uscita è rappresentata in Fig. 5.6c, avendo utilizzato il modello del diodo rappresentato in Fig. 5.5b. 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. 5.5a). Se le escursioni della tensione v_i sono molto più ampie di V_γ , possiamo anche applicare il modello del diodo ideale della Fig. 5.5c. In tal caso si ottiene in uscita la forma d'onda rappresentata in Fig. 5.6d.

Le equazioni (5.4) e (5.5) 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. 5.7: 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.

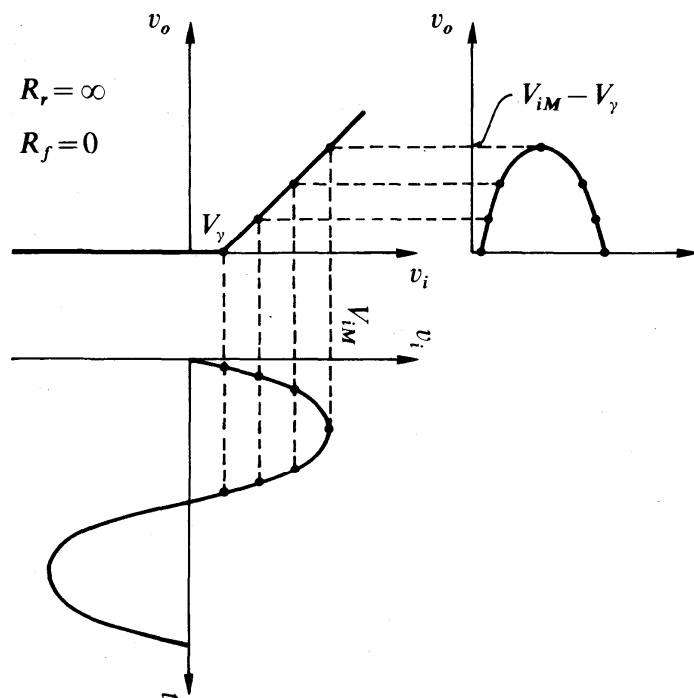


Fig. 5.7 – Procedimento grafico per ricavare l'andamento della tensione d'uscita

L'applicazione più comune dei circuiti raddrizzatori è quella degli alimentatori, che esamineremo più avanti nel Cap. 10. 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.

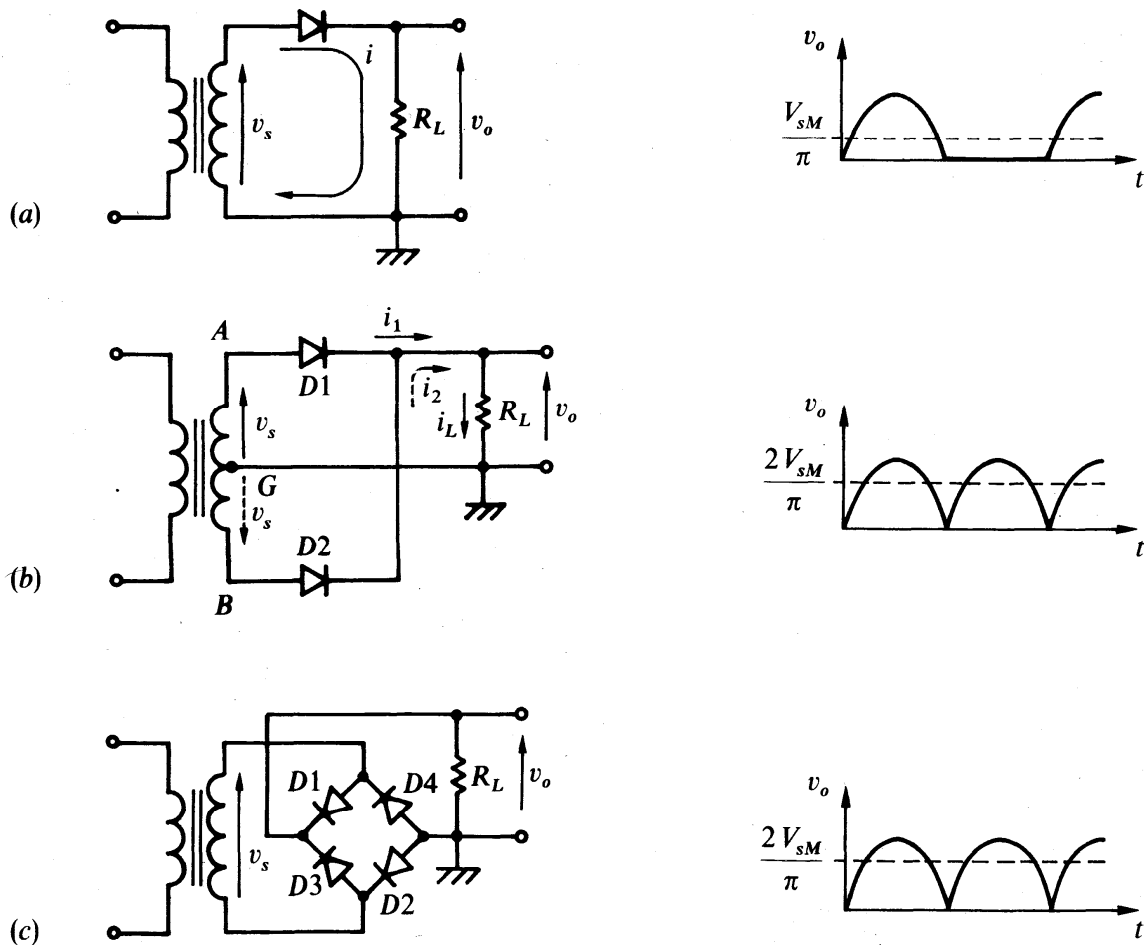


Fig. 5.8 – Raddrizzatori (e rispettive forme d'onda d'uscita):

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

Il funzionamento del primo circuito (Fig. 5.8a) 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}/π .

Il secondo circuito (Fig. 5.8b) 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. 5.8c) 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 Cap. 10 relativo agli alimentatori.

5.5 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. 5.9a. Per il diodo si assume la caratteristica riportata in Fig. 5.9b.

- 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_γ se si considera $R_f = 0$. Applicando invece il modello di Fig. 5.9b (con $R_f \neq 0$), la tensione d'uscita si calcola pari a

$$v_o = V_R + V_\gamma + (v_i - V_\gamma - V_R) \frac{R_f}{R + R_f} . \quad (5.6)$$

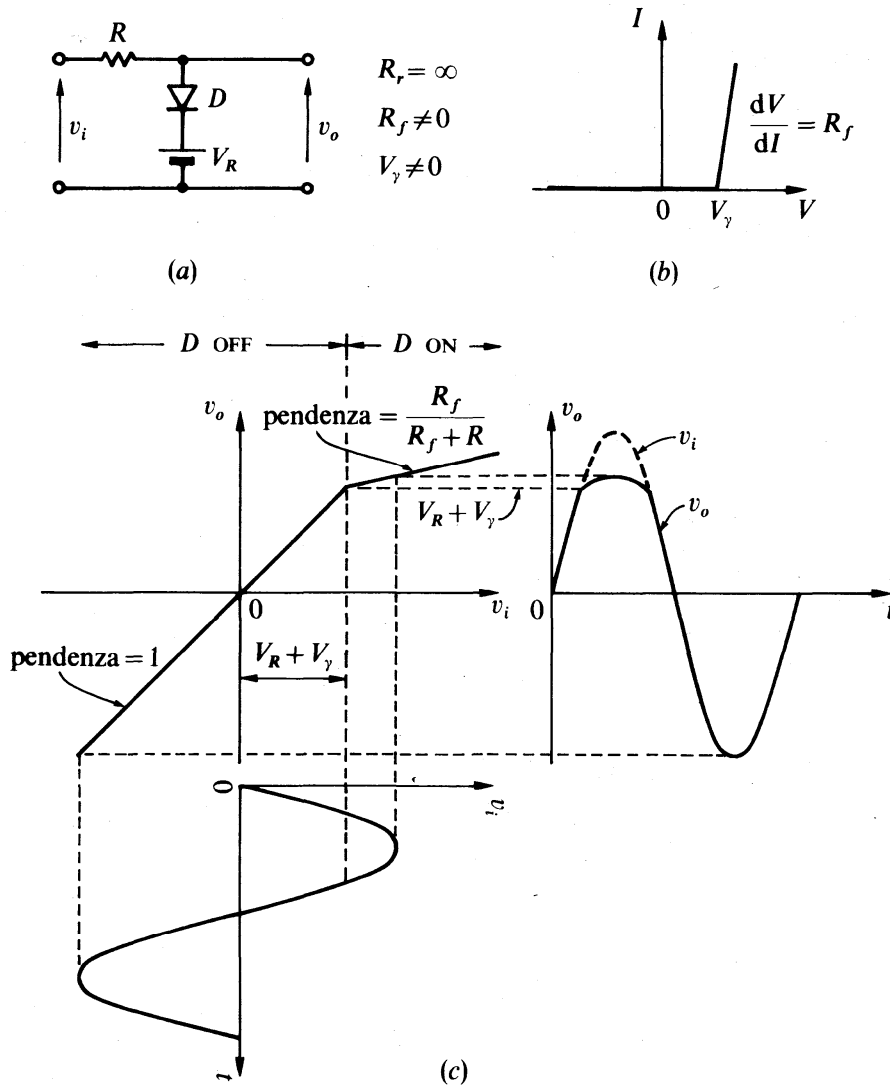


Fig. 5.9 – a) Circuito limitatore. b) Caratteristica del diodo.
c) Transcaratteristica e procedimento grafico per il calcolo di v_o

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 $v_i < V_R + V_y$, l'altro è la retta di coefficiente angolare $R_f/(R + R_f)$ descritta dalla (5.6) per $v_i > V_R + V_y$. La costruzione grafica della tensione d'uscita è riportata in Fig. 5.9c.

La pendenza non nulla del secondo tratto di caratteristica ($v_i > V_R + V_y$) produce una lieve ondulazione nel valore massimo di v_o . Se R_f fosse nulla, allora l'uscita sarebbe costante e pari a $V_R + V_y$. 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

$$v_o = V_R + V_y. \quad (5.7)$$

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. 5.10 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.

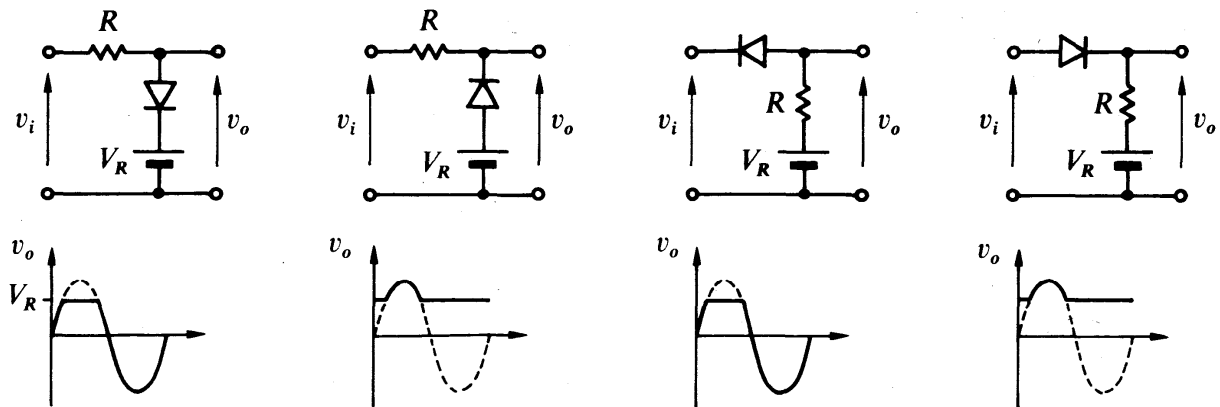


Fig. 5.10 – Circuiti limitatori e forme d’onda relative

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. 5.11.

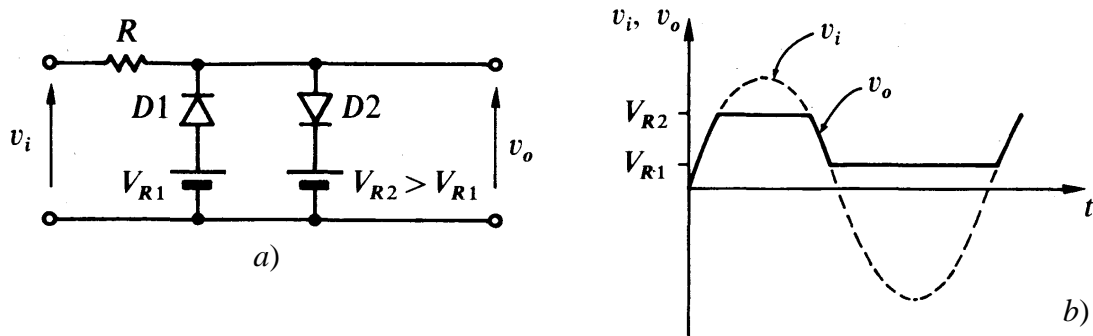


Fig. 5.11 – Circuito limitatore a due livelli e forme d’onda relative

5.6 Circuiti a diodi e capacità

Tipici circuiti che utilizzano diodi e capacità sono i *moltiplicatori di tensione*, i quali vengono utilizzati quando, disponendo di una tensione alternata di una certa ampiezza, si vuole ottenere una tensione continua di valore più elevato (purché sia richiesta una modesta corrente e sia accettabile una certa variazione della tensione d'uscita al variare del carico).

In Fig. 5.12 è illustrato un classico *duplicatore di tensione*. Supponendo R molto elevata, indicato con T il periodo della tensione sinusoidale d'ingresso, si ha:

- da 0 a $T/4$, C_1 si carica alla tensione V_{iM} attraverso D_1 , mentre D_2 è polarizzato inversamente;
- da $T/4$ a $T/2$, entrambi i diodi sono polarizzati inversamente e C_1 rimane carico alla tensione V_{iM} ;
- da $T/2$ a $3T/4$, D_2 viene a trovarsi in conduzione e quindi C_2 si carica anch'esso alla tensione V_{iM} ;
- da $3T/4$ in poi, entrambi i diodi sono polarizzati inversamente e sia C_1 che C_2 rimangono carichi ciascuno alla tensione V_{iM} .

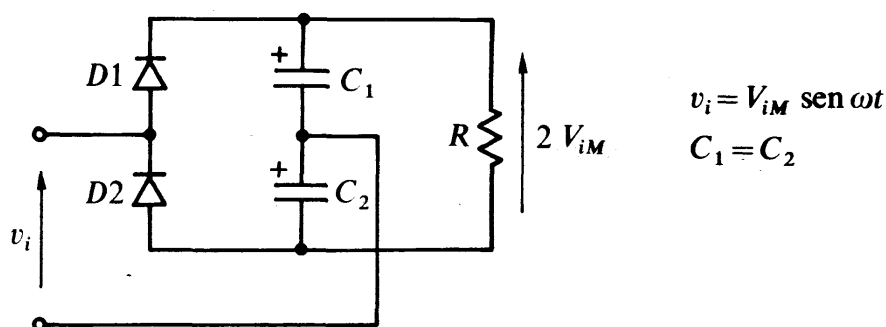


Fig. 5.12 – *Duplicatore di tensione*

Su R pertanto si stabilisce una tensione $2V_{iM}$, pari cioè al doppio del valore di picco della tensione d'ingresso. Naturalmente, in presenza di carico, i condensatori tenderanno a scaricarsi su R e ciò comporterà un'ondulazione tanto più accentuata, quanto minore è il valore di R . Ciò significa che non è proprio vero che da $3T/4$ in poi, entrambi i diodi risultino *sempre* polarizzati inversamente: quando un condensatore si scarica ad una tensione tale che la tensione d'ingresso polarizzi direttamente il diodo, esso conduce e ricarica nuovamente il condensatore.

5.7 Circuiti a diodi e induttanza

L'uso del diodo in parallelo (indicato spesso come *diodo volante*, o *dampner*) trova frequenti applicazioni per la soppressione delle sovratensioni che si generano nelle commutazioni degli interruttori con carichi induttivi.

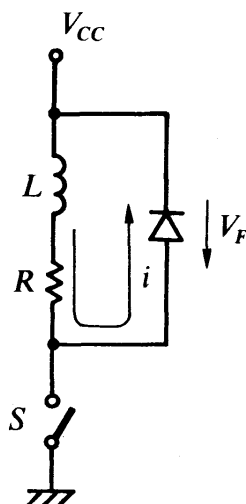


Fig. 5.13 – *Carico induttivo con diodo volante*

Si consideri la Fig. 5.13: in essa è rappresentato un interruttore (generalmente elettronico a semiconduttore) connesso ad un carico induttivo L - R (che può essere costituito, ad esempio, da un relè), in parallelo ad un diodo volante. Supponiamo che l'interruttore sia chiuso e l'alimentazione faccia scorrere una certa corrente sul carico. Quando l'interruttore viene aperto, la corrente si annulla bruscamente: si genera pertanto una forte tensione di autoinduzione (dato che in un'induttanza si ha $v = L di/dt$) che può danneggiare irrimediabilmente l'interruttore a semiconduttore (o, nel caso di interruttore meccanico, può creare un arco fra i suoi contatti). Il diodo, invece, fornisce un percorso alternativo per la corrente, non appena l'interruttore viene aperto: questa, esaurendosi con costante di tempo $\tau = L/R$, scarica l'induttanza dell'energia accumulata. In questo modo, la tensione ai capi dell'interruttore aperto non supera il valore $V_{CC} + V_F$, essendo V_F la tensione ai capi del diodo.

5.8 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. 5.14. 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.

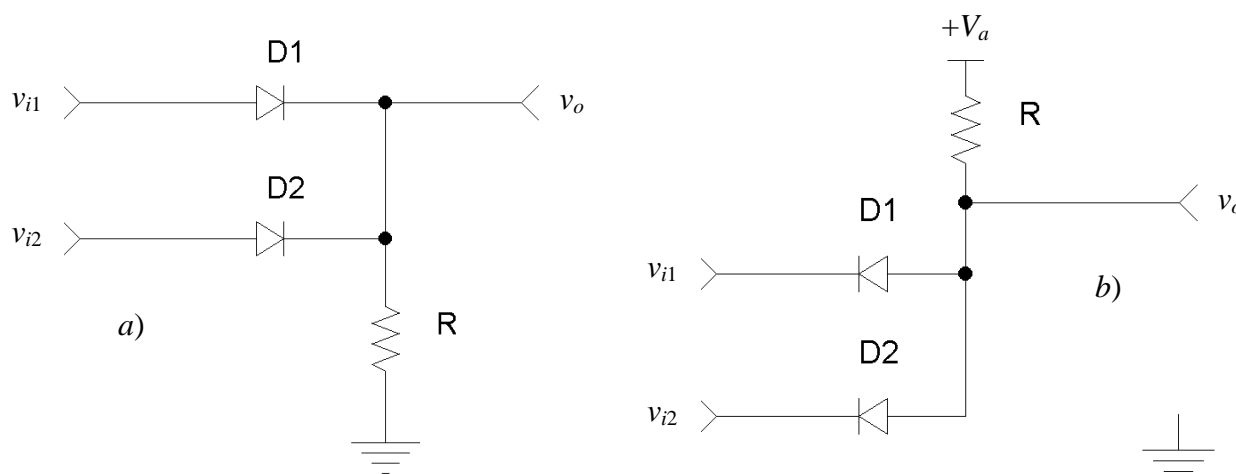


Fig. 5.14 – Circuiti a) OR e b) AND a diodi

Nel circuito OR di Fig. 5.14a, 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. 5.14b, 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. 5.15.

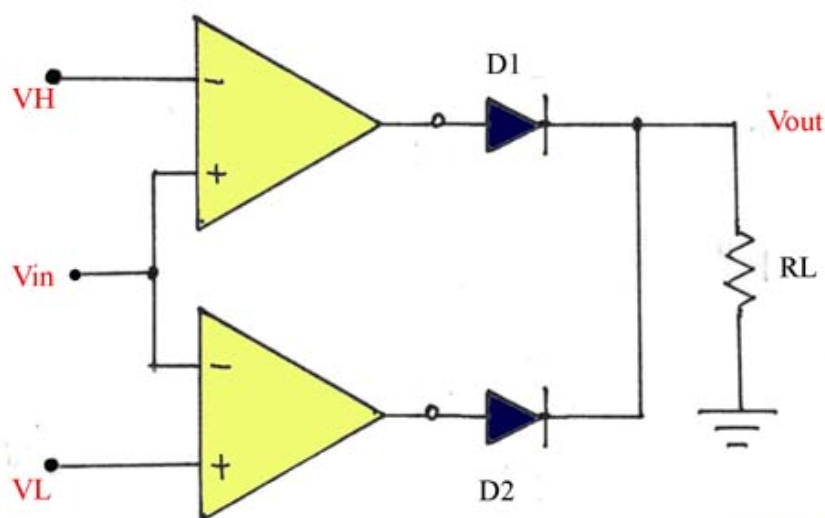


Fig. 5.15 – *Comparatore a finestra*

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:

Vin	$Vout$
$Vin < VL$	H
$VL < Vin < VH$	L
$Vin > VH$	H

^(*) 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.

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 .

5.9 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.

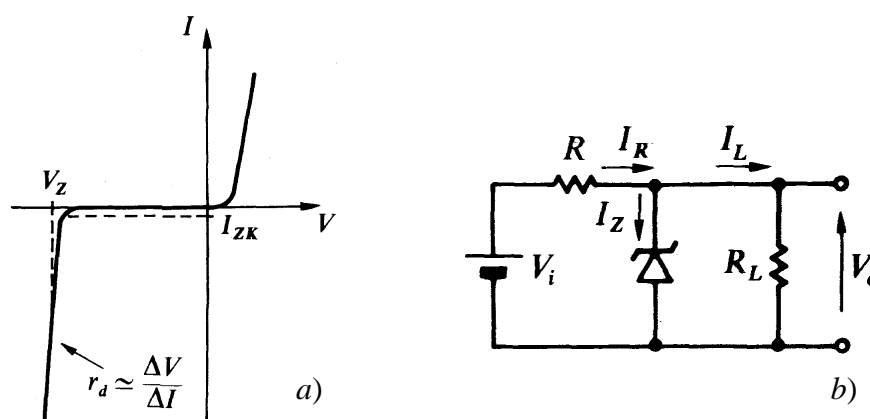


Fig. 5.16 – a) Caratteristica di un diodo Zener. b) Stabilizzatore di tensione con Zener

In Fig. 5.16 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. 5.4) 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. 5.16, 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:

$$I_R = \frac{V_i - V_Z}{R} ; \quad (5.8)$$

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

$$V_o = V_Z , \quad (5.9)$$

dunque la corrente sul carico vale:

$$I_L = \frac{V_Z}{R_L} . \quad (5.10)$$

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

$$I_Z = I_R - I_L . \quad (5.11)$$

La resistenza di polarizzazione si calcola pertanto dalla (5.8), combinandola con la (5.10) e (5.11), 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. 5.16a), 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. 4.6 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.

5.10 Tempo di recupero inverso. Diodi Schottky

La maggior parte delle applicazioni dei diodi richiede commutazioni rapide e brusche dallo stato di conduzione allo stato di interdizione e viceversa; la risposta dei diodi reali è però accompagnata da transitori, cosicché lo stato stazionario viene raggiunto solo dopo un certo intervallo di tempo. Mentre a bassa frequenza l'effetto è poco percepito, quando la frequenza aumenta e si passa da

polarizzazione diretta a polarizzazione inversa il diodo non riesce a “bloccarsi” istantaneamente; pertanto all’inizio dello stato di polarizzazione inversa una piccola corrente scorre nel diodo.

Vediamo di capire le cause di questo fenomeno, analizzando le Figg. 5.17a e 5.17b. Le figure illustrano la conduzione delle cariche libere attraverso la giunzione all’interno delle bande di energia permesse nel caso di polarizzazione diretta (Fig. 5.17a) e nel caso di commutazione a polarizzazione inversa (Fig. 5.17b).

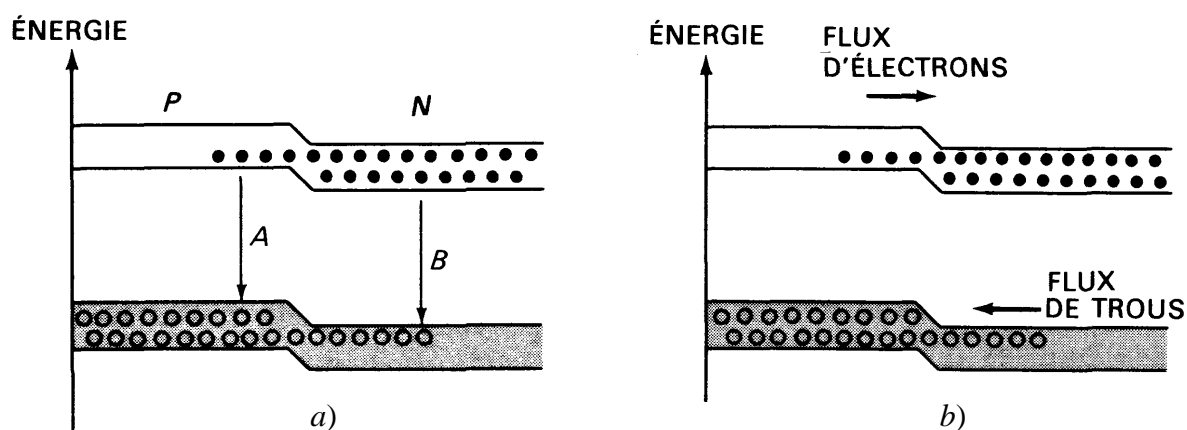


Fig. 5.17 – a) Diodo polarizzato direttamente: si ha accumulazione di cariche nelle bande di energia. b) Diodo commutato in polarizzazione inversa: le cariche accumulate circolano in senso inverso durante un piccolo intervallo di tempo

Come mostrato in Fig. 5.17a, in polarizzazione diretta degli elettroni della banda di conduzione attraversano la giunzione e circolano nella regione p prima di ricombinarsi (*percorso A*). Allo stesso modo, delle lacune attraversano la giunzione e circolano nella regione n prima di ricombinarsi (*percorso B*). Se, per esempio, il tempo di vita è di $1 \mu\text{s}$, questo significa che vi saranno degli elettroni liberi e delle lacune (come portatori minoritari) in un intervallo di tempo medio di $1 \mu\text{s}$ prima della ricombinazione. A causa del tempo di vita non nullo di tali cariche minoritarie, le differenti bande di energia vicino alla giunzione accumulano temporaneamente queste cariche (prima della ricombinazione). Maggiore è la corrente diretta, tanto più grande è la carica accumulata.

Se, ad un certo momento, la giunzione viene polarizzata inversamente in modo brusco, le cariche minoritarie accumulate cambiano verso di circolazione a causa del cambiamento di polarizzazione e danno luogo ad una corrente inversa che rapidamente si estingue (non appena tutte le cariche accumulate sono spazzate via). È evidente che, più il tempo di vita delle cariche è grande,

più il tempo necessario a smaltirle in polarizzazione inversa è grande. Immediatamente dopo la commutazione, come illustrato in Fig. 5.17b, si ha il passaggio di una corrente inversa piuttosto elevata dovuta alla carica accumulata. Non appena i portatori attraversano la giunzione (oppure si ricombinano prima ancora di attraversarla), la corrente scema rapidamente.

Il tempo necessario ad un diodo in polarizzazione diretta per bloccarsi, in seguito ad una inversione istantanea della polarizzazione, prende il nome di *tempo di recupero inverso*. Le condizioni di misura di tale tempo, spesso indicato con t_{rr} , variano da un fabbricante all'altro. Sovente, si stabilisce che t_{rr} è uguale al tempo che impiega la corrente inversa per cadere al 10% della corrente diretta. Il t_{rr} di un diodo 1N4148, per esempio, è di 4 ns: ciò significa che se un tale diodo polarizzato direttamente e percorso da una corrente di 10 mA viene polarizzato inversamente in modo brusco, saranno necessari 4 ns affinché la corrente inversa scenda al valore di 1 mA.

In commercio sono disponibili *diodi per commutazione*, fabbricati in modo da minimizzare il tempo di recupero inverso, che presentano valori di t_{rr} compresi tra valori inferiori a 1 ns e alcuni μs . Il tempo di recupero inverso di questi diodi è tanto piccolo che il suo effetto non è percepibile a frequenze inferiori a circa 10 MHz. Solo a frequenze nettamente maggiori di 10 MHz si deve tenere conto di t_{rr} .

Come si può rimediare al problema del tempo di recupero inverso? La soluzione è quella di un *diodo Schottky*. Esso consta di una giunzione *metallo-semiconduttore*, dove il metallo deve avere un alto *potenziale di ionizzazione* (ad esempio, oro, argento o platino) e il semiconduttore è silicio drogato di tipo *n*. In queste condizioni si forma una barriera di potenziale tra il metallo e il silicio lievemente più bassa rispetto a quella di un'ordinaria giunzione *p-n* in silicio, con il metallo che si comporta in modo analogo al semiconduttore di tipo *p*. Il diodo è allora polarizzato direttamente quando il terminale “+” della batteria è connesso con il metallo ed il terminale “-“ con il semiconduttore. Se il diodo è polarizzato direttamente con una tensione all'incirca pari a quella della barriera, il funzionamento è grossomodo analogo a quello di un normale diodo a semiconduttore. Gli elettroni liberi, pertanto, attraversano la giunzione e penetrano nel metallo, producendo un'elevata corrente diretta. Vi sono però due sostanziali differenze rispetto ad un diodo ordinario: la prima è che, non essendovi lacune nel metallo, non vi può essere accumulo di cariche minoritarie iniettate nel semiconduttore di tipo *n*; la seconda è che gli elettroni provenienti dal semiconduttore di tipo *n* e iniettati nel metallo (che già contiene moltissimi elettroni) non costituiscono ovviamente un accumulo di portatori di minoranza in eccesso. Non essendovi accumulo di cariche, anche il tempo di recupero inverso è in pratica nullo (valore tipico ≈ 50 ps).

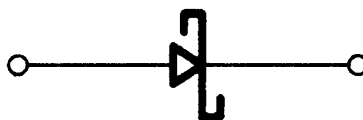


Fig. 5.18 – Simbolo circuitale del diodo Schottky

Un diodo Schottky, il cui simbolo circuitale è rappresentato in Fig. 5.18, può raddrizzare facilmente tensioni a frequenze superiori a 300 MHz. Per tale motivo, i diodi Schottky trovano applicazione tipica nei circuiti a commutazione veloce, come ad esempio negli elaboratori numerici. Si deve infatti considerare che la velocità dei calcolatori dipende dalla velocità di commutazione dei suoi dispositivi, quali diodi e transistor. È in tale campo che eccellono i diodi Schottky! Essi sono infatti divenuti i componenti principali della famiglia logica TTL-Schottky, un gruppo di dispositivi digitali molto utilizzato che esamineremo più avanti nel Cap. 12.

Un'ultima osservazione: a causa della ridotta barriera di potenziale, se polarizzati in senso diretto i diodi Schottky presentano una caduta di tensione pari a circa 0,25 V, più bassa di quella di un normale diodo al silicio. Grazie a tale proprietà, essi sono spesso impiegati per raddrizzare basse tensioni (in modo da poter trascurare la tensione di soglia rispetto alla tensione raddrizzata). Gli alimentatori a basse tensioni contengono sovente diodi Schottky, in luogo di diodi al silicio.

5.11 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. 5.19)

$I_{F(RMS)}$	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

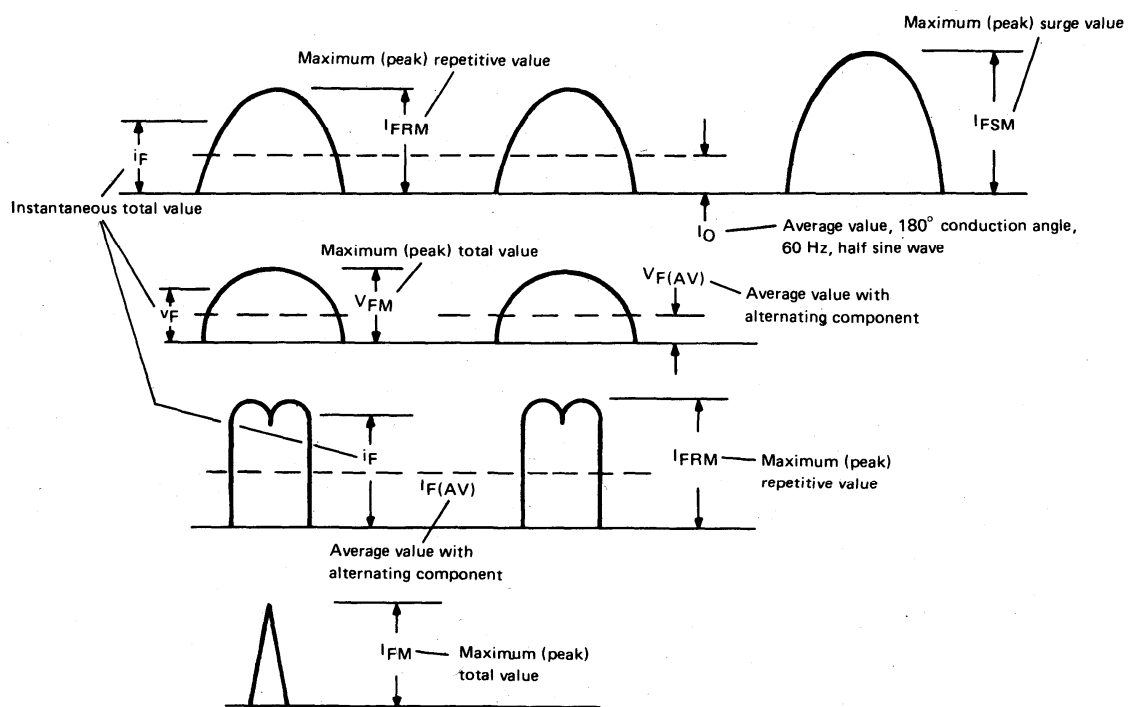


Fig. 5.19 – Diagrammi di correnti e tensioni del diodo polarizzato direttamente

- *Polarizzazione inversa* (cfr. Fig. 5.20)

$I_{R(RMS)}$	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

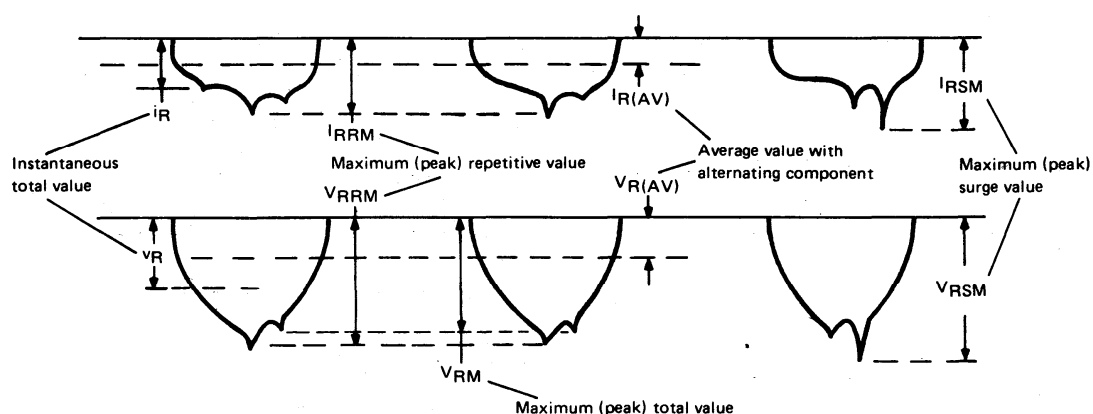


Fig. 5.20 – Diagrammi di correnti e tensioni del diodo polarizzato inversamente

- 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)
α, T_C	Coefficiente di temperatura, assoluto (mV/°C) o relativo (%/°C)