

## Capitolo 4

## Circuiti a diodi

In questo capitolo viene esaminato il comportamento del diodo a giunzione  $p-n$  come elemento circuitale. Viene introdotto il concetto di "retta di carico". Si utilizza il modello lineare a tratti, approssimando la caratteristica con una spezzata, nelle seguenti applicazioni: tosatori (a un livello e a due livelli), comparatori, porte a diodi e raddrizzatori. Sono illustrati i circuiti raddrizzatori a una semionda, a doppia semionda, a ponte e duplicatori di tensione. Si discute il comportamento dei filtri capacitivi.

In tutto questo capitolo viene fatta l'ipotesi che le tensioni nei circuiti varino così lentamente da poter trascurare i tempi di commutazione dei diodi (§ 3.10).

## 4.1 IL DIODO COME ELEMENTO CIRCUITALE

Nella figura 4.1 è mostrato il circuito fondamentale per il diodo: il dispositivo è inserito in serie a una resistenza di carico  $R_L$  e a un generatore di segnale

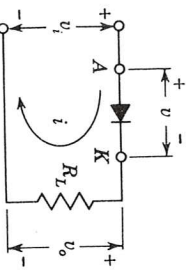


Figura 4.1  
Circuito di base per il diodo. L'anodo (lato  $p$ ) del diodo è contrassegnato con la lettera  $A$ , il catodo (lato  $n$ ) con la lettera  $K$ .

di ingresso  $v_i$ . Si esamina ora il circuito per ricavare i valori istantanei della corrente  $i$  e della tensione  $v$ , quando all'ingresso viene applicata la tensione con il valore istantaneo  $v_i$ .

**Retta di carico.** Utilizzando l'equazione alla maglia (legge di Kirchhoff), si ricava

$$v = v_i - iR_L, \quad [4.1]$$

dove  $R_L$  è il valore della resistenza di carico. Questa sola equazione non è sufficiente per determinare le due incognite  $v$  e  $i$  dell'espressione. Una seconda relazione tra le due incognite viene però fornita dalla caratteristica statica del diodo (fig. 3.7). La figura 4.2a indica la soluzione simultanea dell'equazione [4.1]

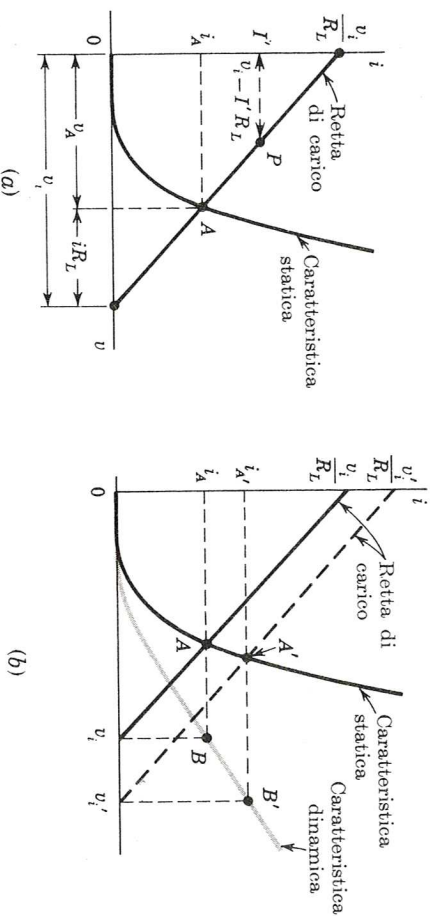


Figura 4.2  
(a) Il punto di intersezione,  $A$ , della retta di carico con la caratteristica statica del diodo indica il valore  $i_A$  della corrente corrispondente a un valore istantaneo  $v_i$  della tensione di ingresso. (b) Metodo per la costruzione della curva dinamica a partire dalla caratteristica statica e dalla retta di carico.

e della caratteristica del diodo. La linea retta, che è rappresentata dall'equazione [4.1], è chiamata *retta di carico*. La retta di carico passa per il punto  $i = 0$ ,  $v = v_i$ ,  $i = v_i/R_L$ ,  $v = 0$ . Cioè, la retta di carico incontra l'asse delle tensioni per  $v = v_i$  e l'asse delle correnti per  $i = v_i/R_L$ . La pendenza di questa retta è quindi determinata dalla resistenza  $R_L$ : il valore negativo della pendenza è perciò  $1/R_L$ . Il punto d'intersezione  $A$  della retta di carico con la caratteristica statica fornisce il valore della corrente  $i_A$  che scorre in queste condizioni. Questa costruzione grafica permette di calcolare il valore della corrente quando il valore istantaneo della tensione in ingresso vale  $v_i$ .

Può sorgere una leggera complicazione nel tracciare la retta di carico quando  $i = v_i/R_L$  è troppo grande per comparire nelle caratteristiche fornite dai costruttori. In questi casi si può scegliere un valore arbitrario della corrente  $I'$  che sia compreso tra i valori presenti sull'asse verticale della caratteristica. Si traccia quindi la retta di carico a partire dal punto  $P$  (vedi fig. 4.2a), dove  $i = I'$ ,  $v = v_i - I'R_L$ , fino a raggiungere il punto  $i = 0$ ,  $v = v_i$ .

**Caratteristica dinamica.** Si supponga ora che la tensione di ingresso possa variare. La procedura indicata in precedenza deve quindi essere ripetuta per tutti i valori di tensione. Si ottiene quindi un diagramma della corrente in funzione della tensione di ingresso; questa curva prende il nome di *caratteristica dinamica* e può essere ottenuta nel modo seguente: si traccia la verticale passante per  $v_i$  sino a incontrare il valore  $i_A$  della corrente nel punto  $B$  (vedi fig. 4.2b). Al variare di  $v_i$ , la pendenza della retta di carico non varia essendo  $R_L$  costante. In tal modo, quando la tensione di ingresso raggiunge il valore  $v'_A$ , il valore corrispondente di corrente è  $i'_A$ . Questa corrente è individuata sulla verticale  $v'_A$  nel punto  $B'$ . La curva  $OB'B'$  che si ottiene in tal modo al variare di  $v_i$  è detta *caratteristica dinamica*.

**La transcaratteristica.** La curva che stabilisce il legame tra la tensione di uscita  $v_o$  e la tensione di ingresso  $v_i$  di un dato circuito, è detta *transcaratteristica* o *caratteristica di trasmissione*. Poiché, come si vede nel circuito della figura 4.1,  $v_o = iR_L$ , in questo particolare circuito la caratteristica di trasferimento ha la stessa forma della caratteristica dinamica.

Occorre mettere in evidenza che, indipendentemente dall'andamento della caratteristica statica (tensione in funzione della corrente), o dalla forma d'onda della tensione in ingresso, la corrispondente forma d'onda della tensione di uscita può sempre essere ricavata graficamente (a basse frequenze) dalla transcaratteristica, mediante la costruzione indicata nella figura 4.3. Si disegna l'andamento

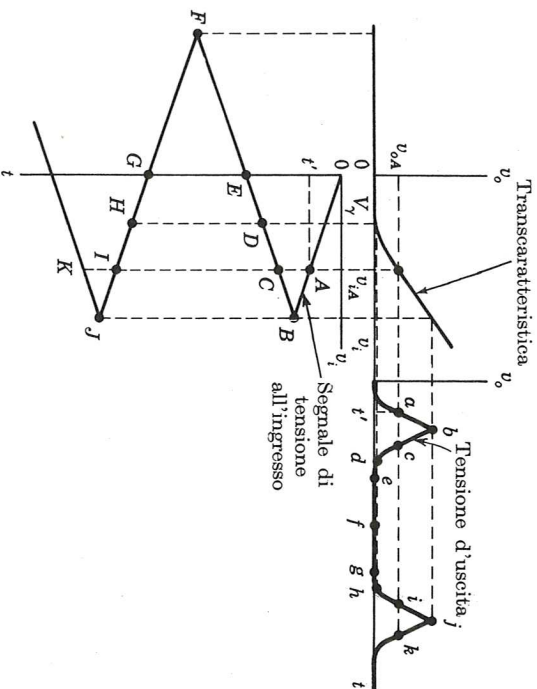


Figura 4.3

Metodo per ottenere la forma d'onda della tensione di uscita a partire dalla transcaratteristica per una determinata forma d'onda della tensione di ingresso.

della tensione di ingresso (non necessariamente triangolare) con l'asse dei tempi verticale e rivolto verso il basso, in modo che l'asse delle tensioni risulti orizzontale. Si supponga che la tensione di ingresso abbia il valore  $v_{jA}$ , indicato dal punto  $A$ , all'istante  $t'$ . Si ottiene il valore corrispondente della tensione di uscita tracciando una retta verticale, passante per il punto  $A$ , la quale incontrerà la transcaratteristica in un punto corrispondente alla tensione  $v_{oA}$ . Questo valore di  $v_o$  viene riportato in  $(a)$  in corrispondenza all'istante  $t'$ . In modo analogo si possono ricavare i punti  $b, c, d, \dots$  della forma d'onda di uscita, corrispondenti ai punti  $B, C, D, \dots$  della forma d'onda della tensione di ingresso. Si noti che per  $v_i < V_p$ , si ha  $v_o = 0$  e quindi il diodo si comporta da *limitatore (clipper)* e una parte del segnale di ingresso non compare all'uscita. Si noti inoltre la distorsione (scostamento dalla linearità) introdotta nella tensione di uscita nell'intorno di  $v_i = V_p$ , a causa della non linearità della transcaratteristica in questa zona.

## 4.2 IL CONCETTO DI RETTA DI CARICO

L'utilizzazione della retta di carico permette l'analisi grafica di molti circuiti che contengono dispositivi molto più complessi del diodo  $p-n$ . Il circuito esterno all'uscita di quasi tutti i dispositivi consiste di un generatore di tensione costante  $V$  (continua) posto in serie a una resistenza di carico  $R_L$ , come indicato nella figura 4.4. Applicando la legge di Kirchhoff per le tensioni a questa maglia di uscita

$$v = V - iR_L$$

[4.2

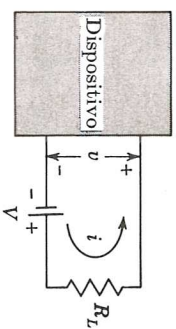


Figura 4.4  
Il circuito di uscita per numerosi dispositivi consiste di una tensione di alimentazione  $V$  posta in serie alla resistenza di carico  $R_L$ .

si individua così nuovamente una relazione lineare tra la corrente di uscita e la tensione di uscita  $v$  del dispositivo. La retta di carico passa per il punto  $i = 0$ , e  $v = V$  e ha una pendenza  $-1/R_L$ , *indipendente dalle caratteristiche del dispositivo*. Il diodo a giunzione  $p-n$  e il diodo valanga possiedono una sola caratteristica tensione-corrente per una data temperatura. Però, la maggior parte degli altri dispositivi deve essere descritta da una famiglia di curve. Ad esempio, facendo riferimento alla figura 3.21 che fornisce le caratteristiche tensione-corrente di un fotodiode, ciascuna curva corrisponde a un determinato valore dell'intensità luminosa. La retta di carico sovrapposta a queste caratteristiche corrisponde a una tensione di 40 V e a una resistenza di carico di 40/800 MΩ = 50 kΩ. Si noti che, dall'intersezione della retta di carico con

la curva corrispondente a un'intensità  $L = 3000$  fc, si ottiene un valore di corrente nel fotodiodo pari a  $530 \mu\text{A}$  e una tensione sul dispositivo di  $13,5$  V. Per  $L = 2000$  fc, si ha  $i = 320 \mu\text{A}$  e  $v = 24,0$  V e così via.

Le caratteristiche tensione-corrente di un transistor (che verranno discusse nel capitolo seguente) sono analoghe a quelle del fotodiodo indicate nella figura 3.21. Però, il parametro indipendente, che viene mantenuto costante per ogni curva è l'intensità della corrente di ingresso del transistor, invece dell'intensità luminosa. Il circuito di uscita è analogo a quello indicato nella figura 4.4, e l'analisi grafica inizia con la costruzione della retta di carico.

#### 4.3 MODELLO DEL DIODO LINEARE A TRATTI

Se si introduce nella caratteristica del diodo della figura 3.9 la resistenza inversa  $R_r$ , si ottiene la caratteristica tensione-corrente continua e lineare a tratti, indicata nella figura 4.5a. In un certo senso il diodo è un dispositivo che

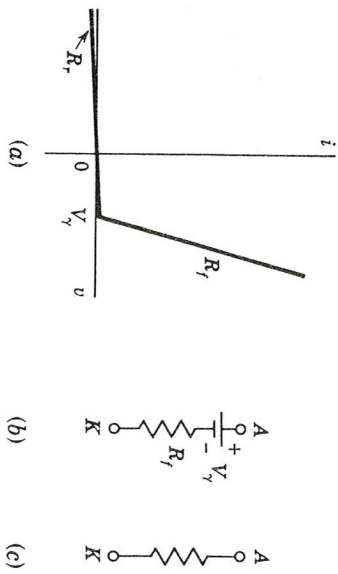


Figura 4.5  
(a) Caratteristica tensione-corrente lineare a tratti di un diodo  $p$ - $n$ . (b) Modello per grandi segnali del diodo in conduzione (la tensione sull'anodo  $A$  è maggiore della tensione del catodo di una quantità superiore a  $V_y$ ). (c) Modello del diodo in interdizione ( $v < V_y$ ).

ha solamente *due stati* possibili di funzionamento; cioè in qualunque istante il diodo può essere solamente ON o OFF. Se la tensione applicata ai capi del diodo supera la tensione di soglia  $V_y$  con l'anodo  $A$  (zona  $p$ ) positivo rispetto al catodo  $K$  (zona  $n$ ), il diodo risulta polarizzato direttamente, e si dice che è nello stato ON. Il modello per grandi segnali del diodo polarizzato direttamente è indicato nella figura 4.5b e consiste di una batteria  $V_y$ , posta in serie alla resistenza diretta  $R_f$  (dell'ordine di pochi decimi di ohm o ancora meno). Un diodo polarizzato inversamente ( $v < V_y$ ) si dice che è nello stato OFF. Il modello per grandi segnali dello stato OFF è indicato nella figura 4.5c e consiste in una resistenza inversa di valore elevato  $R_r$  (dell'ordine di alcune centinaia di kilohm o ancora maggiore). La resistenza inversa  $R_r$  di solito è talmente maggiore di tutte le altre resistenze presenti nel circuito del diodo che può essere considerata infinita. Si considererà perciò nel seguito  $R_r = \infty$ , a meno che non si precisi diversamente.

**Una semplice applicazione.** Nel circuito di base della figura 4.1 si applichi all'ingresso la tensione sinusoidale  $v_i = V_m \sin \alpha$ , dove  $\alpha = \omega t$ ,  $\omega = 2\pi f$  e  $f$  è la frequenza del segnale applicato. Si consideri per il diodo valido il modello lineare a tratti della figura 4.5 (con  $R_r = \infty$ ). La corrente diretta (con  $v_i > V_y$ ) si può ricavare dal circuito equivalente della figura 4.6a. Si ottiene

$$i = \frac{V_m \sin \alpha - V_y}{R_f + R_L} \quad [4.3]$$

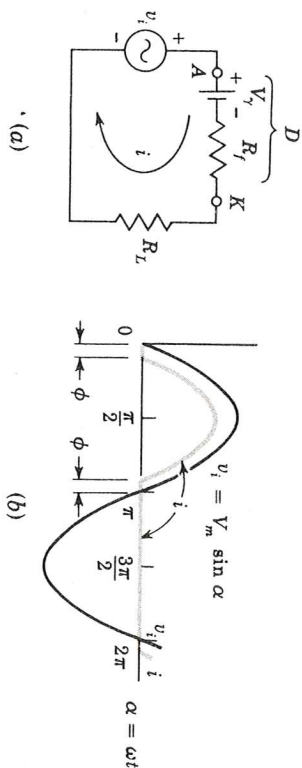


Figura 4.6  
(a) Circuito equivalente del diodo  $D$  (in conduzione) in serie a una resistenza di carico  $R_L$ , e a un generatore di tensione sinusoidale  $v_i$ . (b) Forma d'onda di ingresso  $v_i$  e corrente raddrizzata  $i$ .

per  $v_i = V_m \sin \alpha \geq V_y$ , e  $i = 0$  per  $v_i < V_y$ . La forma d'onda che si ottiene è indicata nella figura 4.6b, dove l'angolo di soglia  $\phi$  è dato da

$$\phi = \arcsin \frac{V_y}{V_m} \quad [4.4]$$

Se, per esempio,  $V_m = 2V_y$ , si ha  $\phi = 30^\circ$ . Per il silicio (germanio) vale  $V_y = 0,6$  V (0,2 V),

si ottiene quindi un angolo di soglia di  $30^\circ$  per una tensione sinusoidale con un valore di picco estremamente basso: 1,2 V per il Si e 0,4 V per il Ge. D'altra parte, se  $V_m \geq 10$  V, si ha  $\phi \leq 3,5^\circ$  per il Si e  $\phi \leq 1,2^\circ$  per il Ge e la tensione di soglia può essere trascurata; il diodo conduce essenzialmente per una semionda completa. Questo raddrizzatore verrà esaminato più in dettaglio nel paragrafo 4.8.

Incidentalmente, il circuito della figura 4.6 può essere usato per caricare una batteria a partire da una tensione alternata. La batteria  $V_B$  può essere posta in serie al diodo  $D$ , e la resistenza  $R_L$  viene regolata a un valore atto a fornire il valore desiderato della corrente continua (valor medio) di carica. Il valore istantaneo della corrente è dato dall'equazione [4.3], aggiungendo  $V_B$  a  $V_y$ .