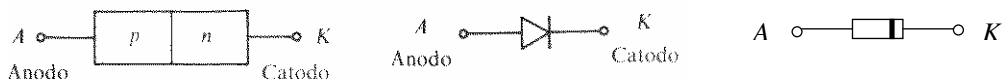


## IL DIODO

### 1 - Generalità

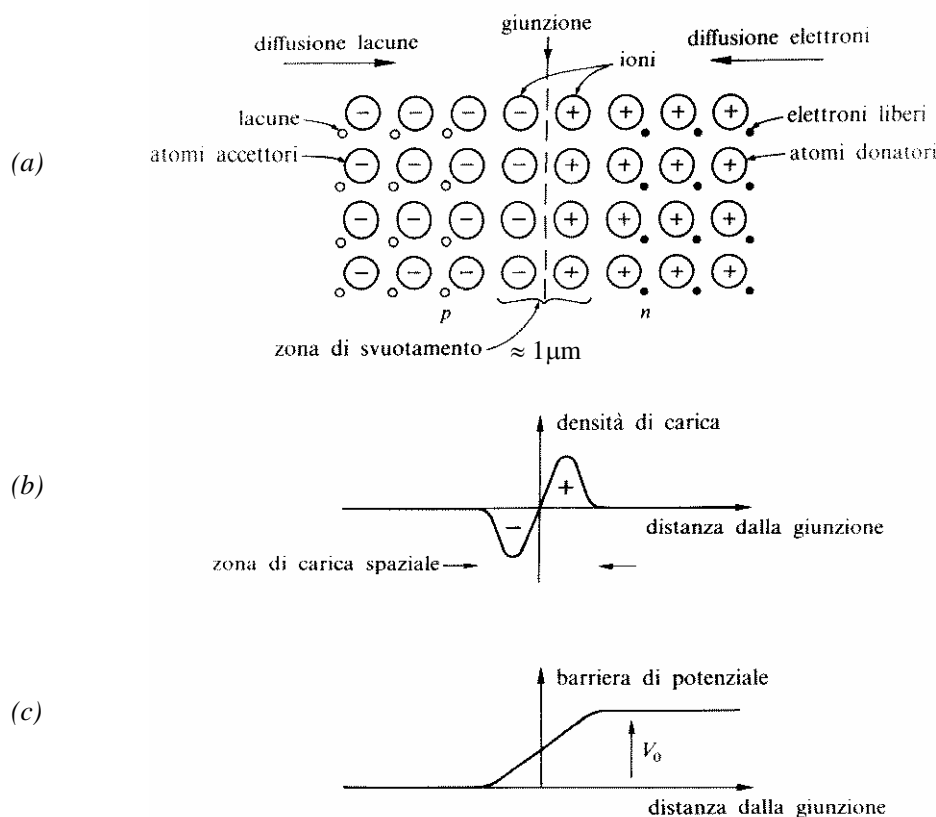
Un cristallo di materiale semiconduttore, drogato in modo da creare una giunzione  $pn$ , costituisce un *diodo* a semiconduttore.

In fig. 1 sono illustrati la struttura e il simbolo circuitale in cui sono evidenziati i terminali di *anodo* e *catodo* corrispondenti alle zone drogate con elementi, rispettivamente, di tipo  $p$  e  $n$ .



**Fig. 1** - Struttura e simbolo circuitale del diodo.

Nella trattazione che segue si presuppone la conoscenza degli elementi fondamentali di fisica dei semiconduttori e la comprensione della situazione che si viene a creare in presenza di una giunzione  $pn$  (fig. 2)

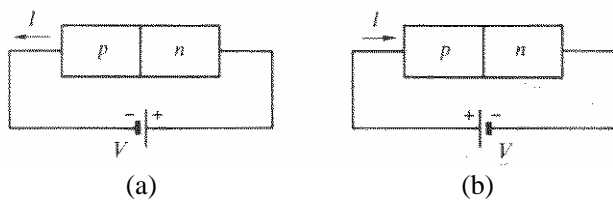


**Fig. 2** - (a) Schema della distribuzione delle cariche elettriche in una giunzione  $pn$ . (b) Densità di carica. (c) Andamento del potenziale elettrico.

Applicando una tensione ai capi di un diodo l'intensità e il verso della corrente sono determinati dalla polarità e dal valore della tensione applicata.

In fig. 3a gli elettroni liberi della zona  $n$  sono attratti verso il morsetto positivo così come le lacune verso quello negativo, determinando un allargamento della zona di svuotamento. La giunzione è *polarizzata inversamente* e la corrente, detta *corrente inversa di saturazione*, risulta debolissima in quanto dovuta esclusivamente ai portatori minoritari (elettroni nella zona  $p$  e lacune nella zona  $n$ ) che trovano condizioni favorevoli per muoversi verso la zona opposta e ricombinarsi in prossimità della giunzione. Se la tensione inversa supera un valore critico detto *tensione di breakdown* o di *rottura*, si ha un innalzamento repentino della corrente inversa con conseguente danneggiamento del dispositivo per surriscaldamento. Tale effetto è dovuto a due meccanismi fisici che si verificano separatamente o in combinazione: l'*effetto Zener* e l'*effetto valanga*. Il primo si ha quando all'interno della giunzione il campo elettrico è così forte da strappare gli elettroni agli atomi ai quali sono in condizioni normali legati; il secondo viene innescato dalla collisione dei portatori minoritari, che hanno acquistato elevata energia

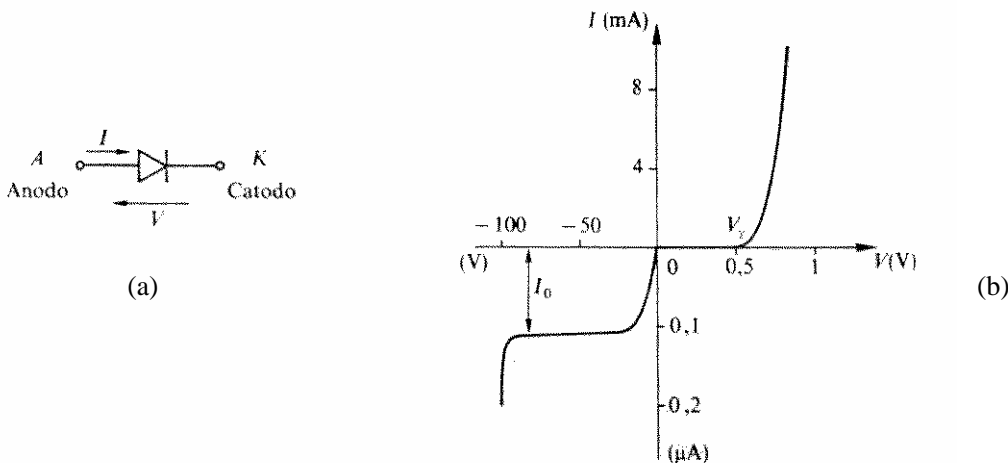
cinetica in virtù dell'elevata intensità del campo elettrico, con gli atomi del reticolo cristallino con conseguente liberazione di elettroni legati (è evidente l'incremento a valanga del fenomeno).



**Fig. 3** - Giunzione pn polarizzata (a) inversamente e (b) direttamente.

In fig. 3b il diodo è polarizzato direttamente e gli elettroni liberi della zona n così come le lacune della zona p sono sospinte dal campo elettrico verso il centro della giunzione. Per bassi valori di  $V$  permane, anche se in misura ridotta, una zona di svuotamento che impedisce la conduzione. Quando però la tensione applicata supera un valore critico detto *tensione di soglia*  $V_\gamma$  si ha l'annullamento della zona di svuotamento e i portatori maggioritari possono liberamente fluire verso la zona opposta e ricombinarsi in prossimità della giunzione. Il diodo è in conduzione e si ha una corrente nel circuito che cresce rapidamente se si aumenta ulteriormente il valore della tensione  $V$ .

La funzionalità del diodo viene descritta dalla *curva caratteristica* che esprime l'andamento della corrente  $I$  al variare della tensione fra anodo e catodo  $V$ . In fig. 4b è rappresentata una tipica curva caratteristica di un diodo al silicio, per il quale si ha una tensione di soglia  $V_\gamma \cong 0,5$  V;  $V_\gamma$  presenta invece valori intorno a 0,1 V per diodi al germanio. Si noti che per le correnti inverse si è usata una scala espansa per poter rappresentare i piccoli valori in gioco, mentre per le tensioni inverse si è usata una scala compressa per poter rappresentare sul grafico valori elevati della tensione inversa.



**Fig. 4** - Simbolo circuitale (a) e caratteristica (b) di un diodo al silicio.

Riassumendo, si può dire che un diodo polarizzato direttamente con tensioni maggiori di  $V_\gamma$  conduce e offre resistenza elettrica molto bassa, diversamente si oppone al passaggio di corrente offrendo una resistenza praticamente infinita.

## 2 - Il diodo come elemento circuitale.

### 2.1 - Resistenza statica e resistenza dinamica.

Si può affermare che la resistenza  $R$  del diodo è data dal rapporto fra  $V$  e  $I$  in un determinato punto della caratteristica, come illustrato in fig. 5a. Il parametro  $R$  così calcolato, detto *resistenza statica*, non è però di grande utilità, poiché dipende dal punto considerato.

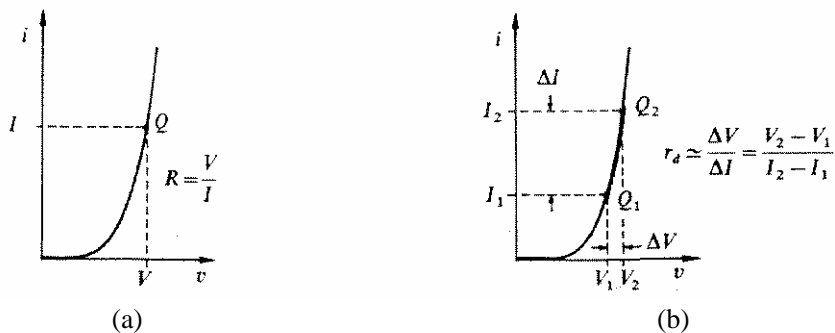


Fig. 5 - Determinazione grafica (a) della resistenza del diodo, (b) della resistenza dinamica del diodo.

E' utile invece considerare la *resistenza dinamica*, definita a partire dalle variazioni di  $v$  e  $i$ :

$$(2.1) \quad r_d = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1}$$

Tale parametro, nell'approssimazione in cui il tratto di caratteristica per  $V > V_\gamma$  può considerarsi rettilineo, è da ritenersi costante per variazioni di tensioni contenute in tale tratto di caratteristica. Ciò significa che quando il diodo è in conduzione una variazione di tensione  $\Delta V$  produce una proporzionale variazione di corrente  $\Delta I$ :

$$(2.2) \quad \Delta V = r_d \Delta I$$

Per la determinazione grafica della resistenza dinamica si veda la fig. 5b.

### Esercizio 2.1

Graficare su carta millimetrata la seguente funzione, che si presta a rappresentare la caratteristica di un diodo:

$$i = 10 \cdot e^{\frac{v-0,7}{0,1}} \quad \text{con } v \text{ in V e } i \text{ in mA (} e: \text{ numero di Nepero pari a circa } 2,72).$$

Eseguire il grafico per valori di  $v$  compresi tra 0 e 0,8 V. Determinare graficamente il valore della resistenza  $R$  per tensioni pari a 0,25 - 0,5 - 0,75 V. Determinare graficamente il valore della resistenza dinamica  $r_d$  con riferimento agli intervalli 0,6-0,7 V e 0,6-0,8 V; verificare che i due valori di  $r_d$  ottenuti sono molto vicini tra loro.

### 2.2 - Studio di un circuito mediante sostituzione del diodo con un modello lineare.

Il metodo fondamentale per studiare un circuito comprendente un diodo consiste nel rappresentare la caratteristica del diodo con due tratti rettilinei, relativi ai due stati di non conduzione e di conduzione, introducendo approssimazioni che non comportano errori sostanziali; ad ognuno dei due tratti della *caratteristica linearizzata* corrisponderà un modello circuitale che andrà a sostituire il diodo consentendo lo studio della rete con gli usuali metodi applicati ai circuiti lineari. Sarà necessario quindi stabilire preliminarmente la condizione di innesco della conduzione nel diodo, per poi risolvere in due fasi distinte (conduzione e non conduzione) lo studio del circuito.

Poiché la corrente di saturazione inversa è normalmente debolissima rispetto alle correnti in gioco, possiamo rappresentare in tutti i casi lo stato di non conduzione con un tratto di caratteristica orizzontale per cui si ha  $i = 0$  per tutti i valori di  $v$  fino a  $V_\gamma$ . Lo stato di conduzione sarà rappresentato in generale da un tratto rettilineo che inizia nel punto  $v = V_\gamma$  e  $i = 0$  proseguendo per valori di  $v$  crescenti con pendenza, cioè con coefficiente angolare, inversamente proporzionale al valore della resistenza dinamica, solitamente indicata con  $R_f$  (fig. 6a).

Evidentemente il diodo in stato di non conduzione andrà sostituito nel circuito con un circuito aperto; il diodo in stato di conduzione andrà sostituito con un generatore di tensione continua  $V_\gamma$ , orientato come in fig. 6a, avente in serie una resistenza di valore  $R_f$ . E' facile constatare (**Esercizio 2.2**) come tale modello abbia una caratteristica, per tensioni superiori a  $V_\gamma$ , identica a quella linearizzata che rappresenta il diodo.

**Caratteristica  
linearizzata**

**Modelli sostitutivi**

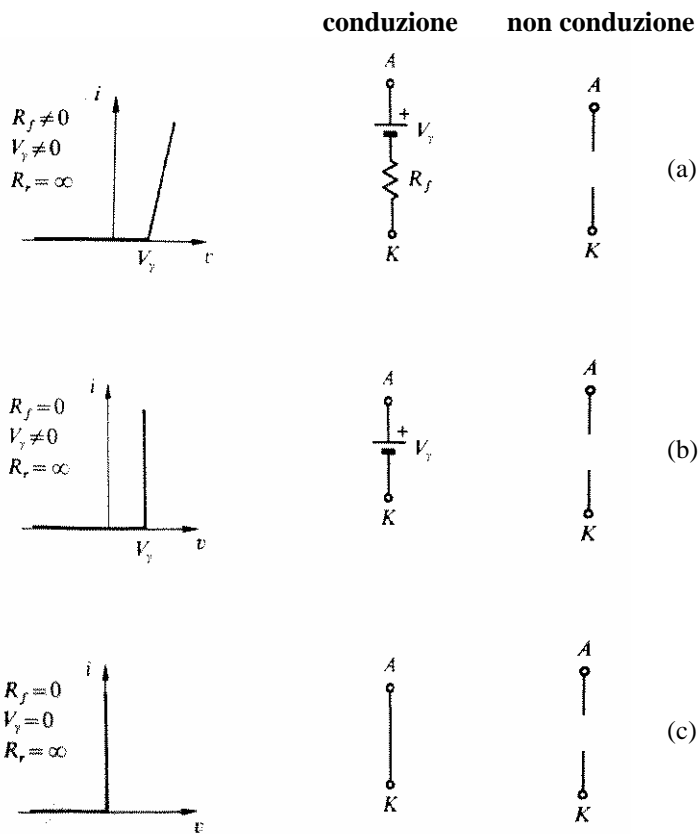


Fig. 6 - Caratteristiche linearizzate del diodo corrispondenti a diversi modelli di approssimazione e relativi modelli sostitutivi.

Il modello del diodo rappresentato in fig. 6a può essere ulteriormente semplificato. Nel caso in cui sia possibile ritenere trascurabile la resistenza diretta dinamica del diodo  $R_f$ , che vale al massimo qualche decina di Ohm, rispetto alla resistenza del ramo in cui è posto il diodo si ottiene il modello di fig. 6b. Se inoltre è possibile trascurare il valore della tensione di soglia  $V_\gamma$ , di qualche decimo di volt, rispetto ai valori caratteristici delle tensioni in gioco nel circuito si ottiene il modello di fig. 6c.

Prima di affrontare lo studio del diodo in presenza di segnali variabili nel tempo è opportuno svolgere alcuni esercizi in corrente continua, al fine di familiarizzare con il metodo di scelta del modello del diodo e con lo studio dei relativi circuiti.

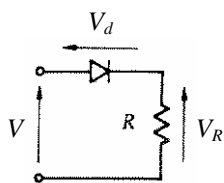


Fig. 7 - Circuito con diodo.

### Esercizio 2.3

Dato il circuito di fig. 7, in cui è presente un diodo avente  $V_\gamma = 0,5 \text{ V}$  e  $R_f = 10 \text{ }\Omega$ , determinare i valori della corrente  $i$  e delle tensioni  $V_d$  e  $V_r$  nei seguenti casi:

2.3.1  $V = 2 \text{ V}$ ,  $R = 20 \text{ }\Omega$

2.3.2  $V = 2 \text{ V}$ ,  $R = 1 \text{ k}\Omega$

2.3.3  $V = 200 \text{ V}$ ,  $R = 10 \text{ k}\Omega$

2.3.4  $V = 0,5 \text{ V}$ ,  $R = 20 \text{ }\Omega$

2.3.5  $V = 0,7 \text{ V}$ ,  $R = 100 \text{ }\Omega$

2.3.6  $V = -0,5 \text{ V}$ ,  $R = 20 \text{ }\Omega$

2.3.7  $V = -0,5 \text{ V}$ ,  $R = 1 \text{ k}\Omega$

2.3.8  $V = -20 \text{ V}$ ,  $R = 100 \text{ }\Omega$

## 3 - Il diodo come elemento raddrizzatore

### 3.1 - Raddrizzatore e alimentatore

Si definisce *raddrizzamento* l'operazione mediante la quale un circuito alimentato in ingresso da un segnale bipolare fornisce in uscita un segnale unipolare, avente valor medio diverso da zero.

La principale applicazione dei circuiti raddrizzatori riguarda i segnali sinusoidali; poiché infatti la maggior parte dei dispositivi elettronici necessita di una tensione di alimentazione continua, per consentire il funzionamento di tali dispositivi sfruttando l'energia elettrica presente nella tensione di rete (tensione sinusoidale con frequenza  $f = 50$  Hz e valore efficace  $v_{eff} = 220$  V) è necessario un dispositivo definito *alimentatore*. In fig. 8 è illustrato uno schema a blocchi semplificato di un alimentatore, comprendente:

- Trasformatore. Ha il compito di variare l'ampiezza della tensione sinusoidale in modo da ottenere la tensione continua desiderata.
- Raddrizzatore. Ha il compito di rendere unipolare la tensione.
- Filtro. Ha il compito di livellare la tensione unipolare fornita dal raddrizzatore.
- Regolatore. Ha il compito di mantenere il valore prefissato della tensione continua in modo tale che non sia influenzato da variazioni dei parametri dei componenti circuitali dell'alimentatore, della tensione di rete, del carico applicato (ossia della resistenza del circuito utilizzatore, che determina la corrente assorbita).



Fig. 8 - Schema a blocchi di un alimentatore.

Nell'applicazione di un diodo all'interno di un circuito raddrizzatore si sfruttano i diversi comportamenti del diodo a seconda della polarità della tensione sul proprio ramo, in modo da ottenere tensioni unipolari.

### 3.2 - Raddrizzatore ad una semionda

Il raddrizzatore ad una semionda, così definito per la forma d'onda del segnale di uscita che ricalca l'ingresso per un semiperiodo, è costituito dal semplice circuito di fig. 9.

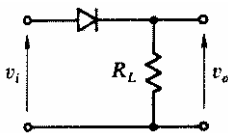
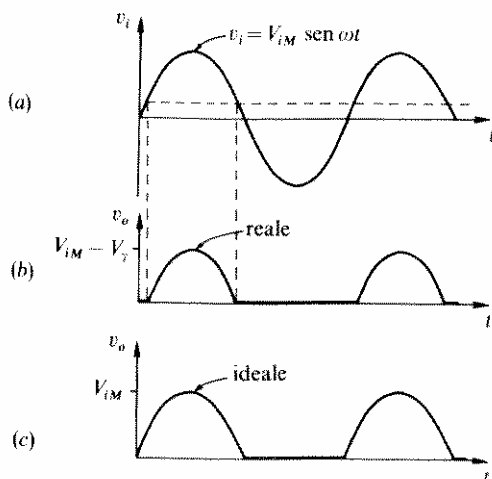


Fig. 9 - raddrizzatore ad una semionda.

Nell'approssimazione in cui il comportamento del diodo è descritto dalla caratteristica di fig. 6c, si ha il seguente comportamento:

- quando la polarità di  $v_i$  è positiva, cioè concorde con il verso in figura, il diodo conduce; sostituendolo con un cortocircuito si ha  $v_o = v_i$ ;
- quando la polarità di  $v_i$  è negativa, cioè discorde con il verso in figura, il diodo non conduce; sostituendolo con un circuito aperto si ha  $i = 0$  e quindi  $v_o = 0$ .

Si ottiene pertanto il segnale riprodotto in fig. 10c. Se si tiene conto della presenza della tensione di soglia  $V_\gamma$  (caratteristica di fig. 6b), si dovrà modificare l'andamento di  $v_o$  come indicato in fig. 10b, in quando il diodo inizierà a condurre per  $v_i = V_\gamma$  e si avrà  $v_o = v_i - V_\gamma$  per tutto l'intervallo di conduzione. In particolare il valore massimo di  $v_o$  sarà  $V_{iM} - V_\gamma$ . Se si tiene conto anche della resistenza dinamica del diodo  $R_f$  (caratteristica di fig. 6a), si dovrà modificare ulteriormente la forma d'onda di fig. 10b, in quanto la caduta di tensione sul diodo non sarà costante, ma aumenterà con l'aumento della tensione d'ingresso, e quindi della corrente, secondo la legge  $v_d = V_\gamma + R_f i$ . La forma d'onda risulterà pertanto un poco schiacciata rispetto al grafico di fig. 10b.



**Fig. 10** - Raddrizzatore a una semionda. (a) Segnale di ingresso. (b) Segnale di uscita ideale (caratteristica di fig. 6c). (c) Segnale di uscita reale (caratteristica di fig. 6b).

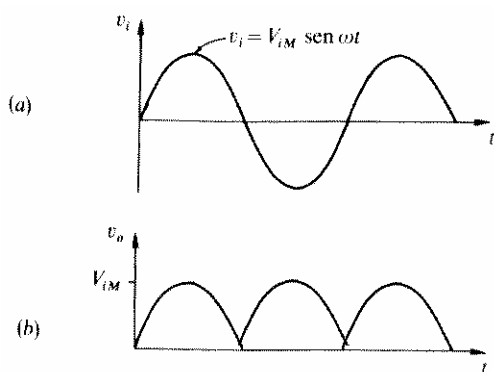
### 3.3 - Raddrizzatore a doppia semionda a ponte di Graetz

Nei raddrizzatori a doppia semionda sono presenti entrambe le semionde del segnale di ingresso, però con identica polarità. Il raddrizzatore a ponte di Graetz è costituito dal circuito di fig. 11.



**fig. 11** - Raddrizzatore a doppia semionda a ponte di Graetz.

Al fine di semplificare l'analisi considereremo i diodi ideali (caratteristica di fig. 6c). Durante il semiciclo positivo di  $v_i$ , la corrente scorre in  $D1, R_L, D2$ , essendo questi due diodi polarizzati direttamente; la tensione  $v_o$  sarà positiva. Durante il semiciclo negativo di  $v_i$ , la corrente scorre in  $D3, R_L, D4$ , essendo questi due diodi polarizzati direttamente; poiché la corrente scorre il  $R_L$  con lo stesso verso di prima, la tensione  $v_o$  sarà ancora positiva. Si otterrà pertanto la forma d'onda raffigurata in fig. 12b.



**Fig. 12** - Raddrizzatore a ponte di Graetz. (a) Segnale di ingresso. (b) Segnale di uscita.

#### Esercizio 3.1

Determinare il segnale di uscita del raddrizzatore a ponte di Graetz, graficandone l'andamento in colonna rispetto a  $v_i$  (come in fig. 12), nel caso in cui il comportamento del diodo sia descritto

- dalla caratteristica di fig. 6b;
- dalla caratteristica di fig. 6a.