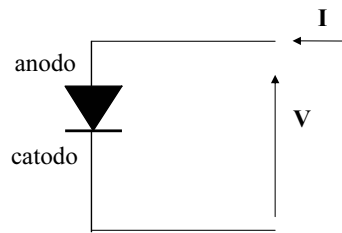
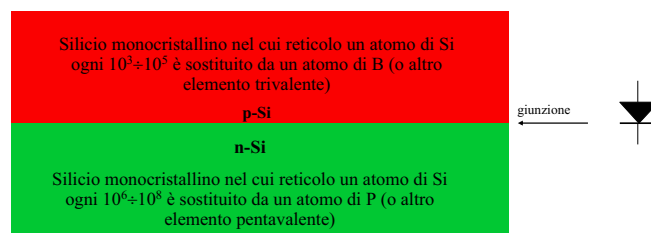


## Diodi a giunzione p/n.



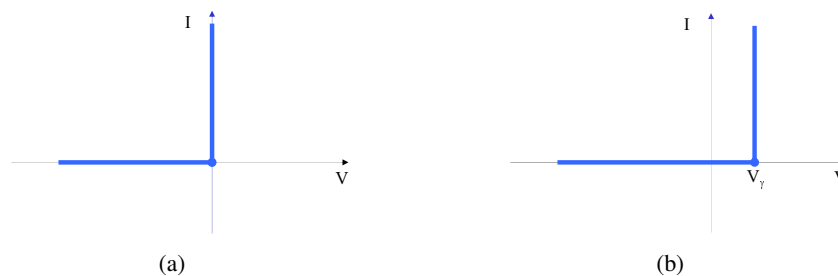
**Fig. 1** - Simbolo e versi positivi convenzionali per i diodi.

I **diodi** sono dispositivi elettronici a 2 terminali caratterizzati dalla proprietà di poter condurre correnti molto maggiori in un verso che nel verso opposto; attualmente quelli più comunemente usati sono i diodi **a giunzione p/n** la cui struttura schematica è rappresentata nella figura 2.



**Fig. 2** - Struttura schematica di un diodo a giunzione p+/n.

### Modelli resistivi dei diodi.



**Fig. 3** - Caratteristiche  $V \rightarrow I$  dei modelli (a) a soglia nulla, (b) a soglia non nulla.

I principali modelli che interpretano il comportamento essenziale di un diodo a giunzione sono i resistori con caratteristica tensione-corrente non lineare descritti nel seguente elenco con riferimento alla figura 1.

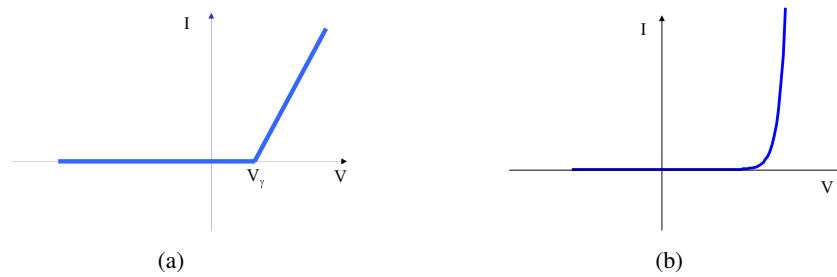
- Modello a soglia nulla:

$$\begin{aligned} I &= 0 & \text{per } V \leq 0 & \quad (\text{conduttanza differenziale : } g = 0) \\ V &= 0 & \text{per } I \geq 0 & \quad (\text{resistenza differenziale : } r = 0) \end{aligned}$$

- Modello a soglia:

$$\begin{aligned} I &= 0 & \text{per } V \leq V_\gamma & \quad (\text{conduttanza differenziale : } g = 0) \\ V &= V_\gamma & \text{per } I \geq 0 & \quad (\text{resistenza differenziale : } r = 0) \end{aligned}$$

nelle quali  $V_\gamma$  assume generalmente valori compresi fra 0.6 e 0.8 volt.



**Fig. 4** - Caratteristiche  $V \rightarrow I$  dei modelli (a) a soglia e resistenza, (b) esponenziale.

- Modello a soglia e resistenza:

$$I = 0 \quad \text{per } V \leq V_T \quad (\text{conduttanza differenziale : } g = 0)$$

$$V = V_T + R_S I \quad \text{per } I \geq 0 \quad (\text{resistenza differenziale : } r = R_S)$$

- Modello esponenziale:

$$I = I_S(e^{\frac{V}{V_T}} - 1) \quad (\text{conduttanza differenziale : } g = \frac{I_{OP} + I_S}{V_T} \simeq \frac{I_{OP}}{V_T})$$

ovvero

$$V = V_T \ln \left[ 1 + \frac{I}{I_S} \right] \quad (\text{resistenza differenziale : } r = \frac{V_T}{I_{OP} + I_S} \simeq \frac{V_T}{I_{OP}})$$

nelle quali  $V_T = \frac{kT}{q}$  è la **tensione termica**;  $k$  indica qui la costante di Boltzmann ( $\sim 1.3810^{-23} \text{J}/^\circ\text{K}$ ,  $T$  è la temperatura assoluta e  $q$  il valore assoluto della carica elettronica ( $\sim 1.6010^{-19} \text{C}$ ). La corrente  $I_S$  viene detta **corrente di saturazione** ed è proporzionale all'area della giunzione, essendo la corrispondente densità di corrente dell'ordine di  $10^{-17} \text{A}/\mu\text{m}^2$  (quindi  $I_S \sim 1 \text{fA}$  per un'area di  $100 \mu\text{m}^2$ ).

- Modello esponenziale con coefficiente di emissione:

$$I = I_S(e^{\frac{V}{NV_T}} - 1) \quad (\text{conduttanza differenziale : } g = \frac{I_{OP} + I_S}{NV_T} \simeq \frac{I_{OP}}{NV_T})$$

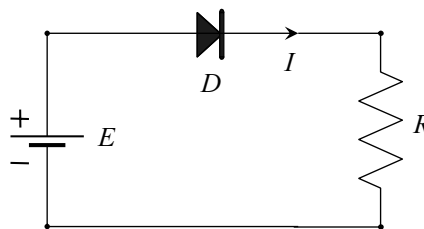
ovvero

$$V = NV_T \ln \left[ 1 + \frac{I}{I_S} \right] \quad (\text{resistenza differenziale : } r = \frac{NV_T}{I_{OP} + I_S} \simeq \frac{NV_T}{I_{OP}})$$

- Modello esponenziale con coefficiente di emissione e resistenza:

$$V = NV_T \ln \left[ 1 + \frac{I}{I_S} \right] + R_S I \quad (\text{resistenza differenziale : } r = \frac{NV_T}{I_{OP} + I_S} + R_S \simeq \frac{NV_T}{I_{OP}} + R_S)$$

**Esempi di applicazioni dei diodi.**



**Fig. 5** - Un semplice circuito con diodo.

Il più elementare circuito contenente un diodo è rappresentato nella figura 5: dati i parametri  $E$ ,  $R$  e un modello di  $D$ , si vuole calcolare la corrente  $I$ . Con riferimento al modello esponenziale, l'equazione della maglia

$$E - V_T \ln \left( 1 + \frac{I}{I_S} \right) + RI = 0 \quad (1)$$

deve essere risolta nell'incognita  $I$  che però non si può esplicitare: il risultato può essere ottenuto soltanto numericamente procedendo, ad esempio, nel modo seguente.

Dalla (1) si ricava

$$I = \frac{E}{R} - \frac{V_T}{R} \ln \left[ 1 + \frac{I}{I_S} \right] \quad (2)$$

e si considera la successione di operazioni ricorrenti

$$I_{k+1} = \frac{E}{R} - \frac{V_T}{R} \ln \left[ 1 + \frac{I_k}{I_S} \right] \quad (3)$$

che è possibile eseguire dopo aver scelto un opportuno valore iniziale  $I_0$ . Se l'algoritmo converge si troverà che, da una certa  $k$  in poi e per un prefissato numero di cifre significative, risulta  $I_{k+1} = I_k$ ; si è, cioè, trovato il **punto fisso** di una **mappa iterativa** del tipo

$$X_{k+1} = F[X_k] \quad (4)$$

Per esempio, con  $E = 5\text{V}$ ,  $R = 5\text{k}\Omega$ ,  $I_S = 1\text{fA}$ ,  $V_T = 25\text{mV}$  e  $I_0 = 1\text{mA}$ , si trovano successivamente le correnti (in mA):  $I_1 = 0,862$ ;  $I_2 = 0,863$ ;  $I_3 = 0,863$ .

L'eventuale divergenza dell'algoritmo può essere controllata a priori supponendo che  $X_k$  sia così prossimo al valore di punto fisso  $X_F = F(X_F)$  da poter approssimare il rapporto incrementale con la derivata della funzione nel punto fisso<sup>(1)</sup>:

$$F'(X_F) \simeq \frac{F(X_k) - F(X_F)}{X_k - X_F} = \frac{X_{k+1} - X_F}{X_k - X_F} \quad (5)$$

Evidentemente l'iterazione produce un valore  $X_{k+1}$  più discosto da  $X_F$  di quanto non sia  $X_k$  se

$$\frac{|X_{k+1} - X_F|}{|X_k - X_F|} \simeq |F'(X_F)| > 1 \quad (6)$$

Il lettore è invitato a verificare che nel caso della mappa (3) il procedimento iterativo diverge se la corrente di punto fisso è minore di  $V_T/R - I_S$ , un valore generalmente assai più piccolo dei valori di corrente interessanti.

### Raddrizzatore a semionda.

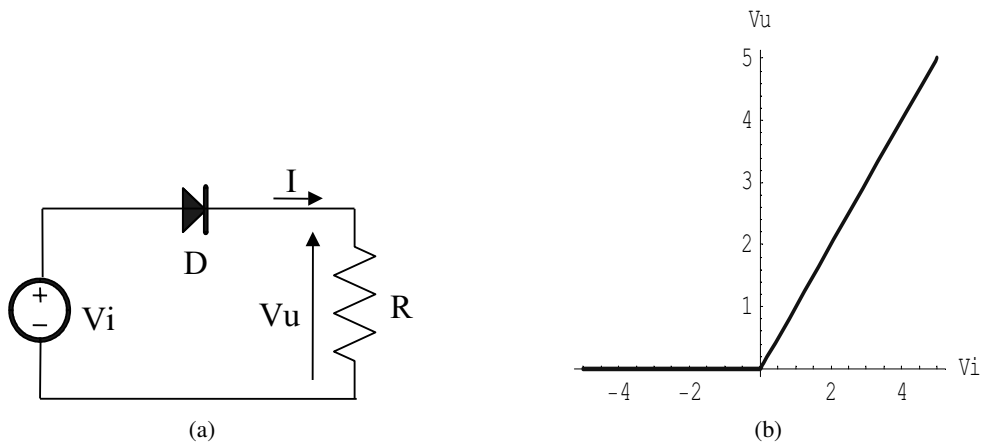
### Raddrizzatori a onda intera (o a doppia semionda).

### Rivelatore di cresta.

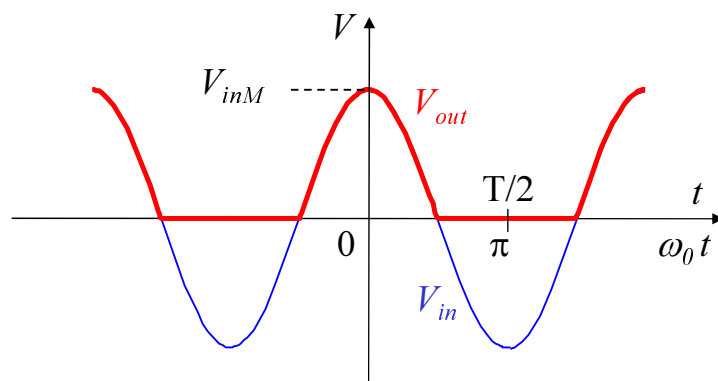
Nella figura 11 sono riportati risultati di una simulazione del comportamento del circuito di Fig. 10 sollecitato da una tensione di ingresso sinusoidale e nel caso in cui la costante di tempo  $\tau = RC$  sia sufficientemente grande. Si nota che la tensione di uscita, dopo un transitorio che dura circa un quarto di periodo, si stabilizza su un valore praticamente costante che differisce dal valore di cresta dell'ingresso per una quantità  $V_\gamma \simeq 0.65\text{V}$ ; si comprende quindi che se il modello del diodo, invece che esponenziale come sempre avviene nelle simulazioni analogiche, fosse a soglia nulla, si sarebbe ottenuto  $V_{out} = \text{Max}[V_{in}]$ .

Aggiornato al 28 dicembre 2004

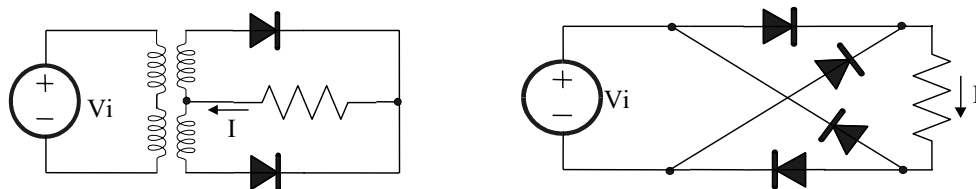
<sup>1</sup>Tralasciamo per semplicità i casi in cui la funzione non sia derivabile nel punto fisso in esame.



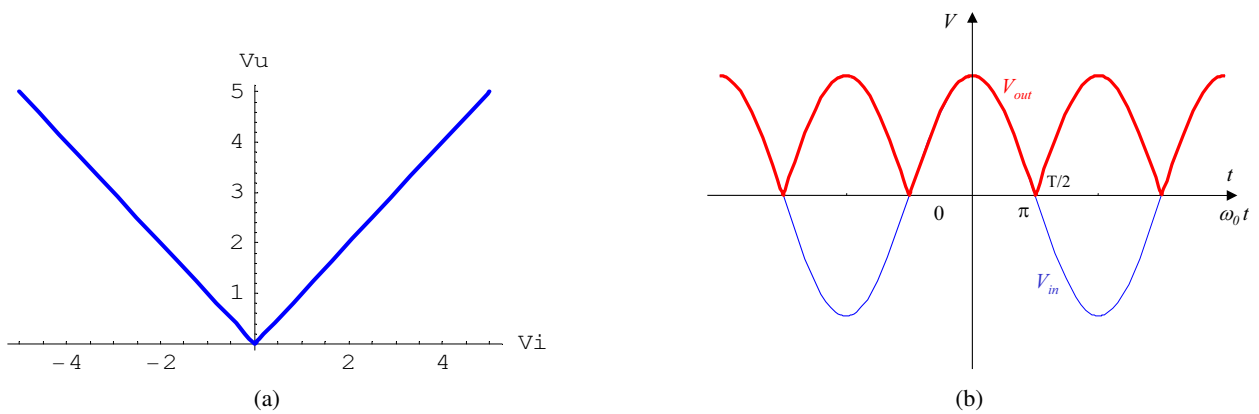
**Fig. 6** - Raddrizzatore a semionda: a) circuito, b) caratteristica in-out.



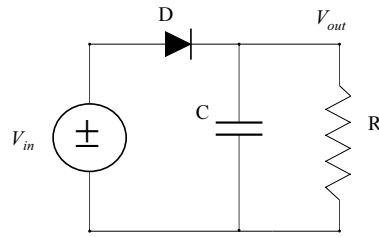
**Fig. 7** - Risposta di un raddrizzatore a semionda a una tensione di ingresso sinusoidale.



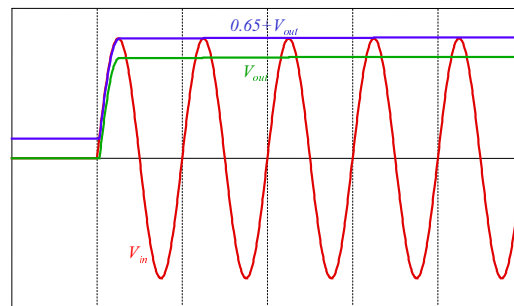
**Fig. 8** - Raddrizzatori a onda intera.



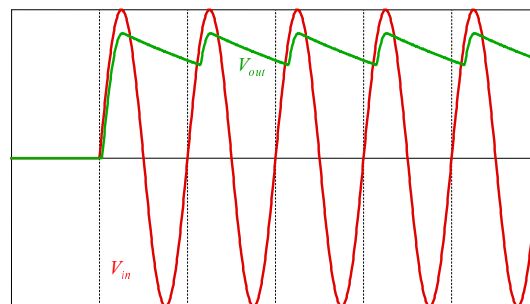
**Fig. 9** - Raddrizzatore a onda intera: a) caratteristica in-out, b) risposta a ingresso sinusoidale.



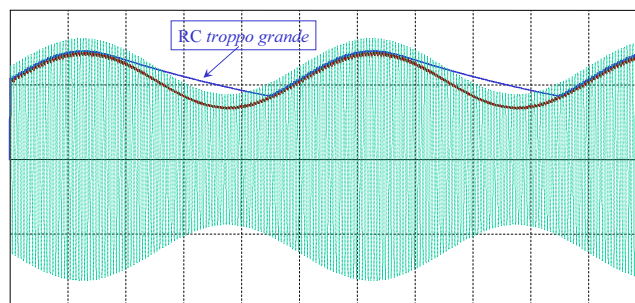
**Fig. 10** - Rivelatore di cresta a diodo.



**Fig. 11** - Forme d'onda simulate per un rivelatore di cresta a diodo a grande costante di tempo con ingresso sinusoidale.



**Fig. 12** - Forme d'onda simulate per un rivelatore di cresta con ingresso sinusoidale.



**Fig. 13** - Se la costante di tempo è troppo grande l'involuppo non viene rivelato correttamente.