

- 1.
- 1.1. Funzionamento
  - 1.1.1. Drogaggio
  - 1.1.2. Campo elettrico di built-in
  - 1.1.3. Larghezza della zona di svuotamento
  - 1.1.4. Curve caratteristiche
    - Polarizzazione
    - Polarizzazione diretta
    - Polarizzazione inversa
    - Caratteristica tensione-corrente
  - 1.1.5. Modelli per il diodo: modello DC
  - 1.1.6. Resistenza dinamica del diodo
- 2.
- 2.1. Raddrizzatore 1 semionda
- 2.2. Raddrizzatore con filtro capacitivo
- 2.3. Ponte di diodi (graetz)

## Diodi

## Circuiti a diodi

### 1. Diodi

Il diodo è sostanzialmente costituito da una giunzione *pn* opportunamente contattata verso l'esterno da giunzioni ohmiche. Il lato *p* del diodo è detto *anodo*, mentre quello *n* è detto *catodo*. La figura mostra la simbologia che si adotta per questo dispositivo.



figura 1

La caratteristica saliente del diodo è, in prima approssimazione, data dalla proprietà di permettere il passaggio di corrente in una direzione ma non nella direzione opposta. Tale caratteristica viene detta *capacità raddrizzante* del diodo.

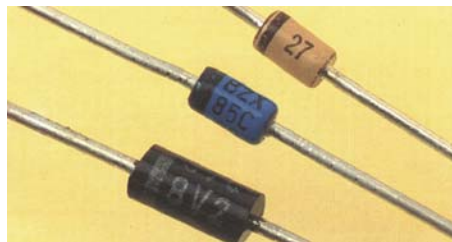


figura 2

## 1.1.Funzionamento

Un semiconduttore cosiddetto *puro*, ossia interamente costituito dal materiale nominale, è definito *intrinseco*. Tale tipo di semiconduttore non ha un numero di elettroni in banda di conduzione tale da poter generare una ragionevole corrente elettrica. Per incrementare questo numero una possibilità consiste nel far acquisire agli elettroni in banda di valenza una energia sufficiente a far sì che oltrepassino l'*energy-gap*. Un modo per far ciò è quello di innalzare la temperatura del materiale (il calore è una forma di energia): aumenta così la corrente a parità di campo applicato. I semiconduttori hanno perciò un *coefficiente di temperatura* negativo, ossia la loro resistenza diminuisce all'aumentare della temperatura. Questo mezzo di aumentare il numero di elettroni, cosiddetti *portatori*, a favore di una maggiore corrente elettrica è però evidentemente poco praticabile. Una ulteriore modalità è data dal cosiddetto *drogaggio* del semiconduttore, che rende il semiconduttore *estrinseco*.

### 1.1.1. Drogaggio

Quando, in un qualsiasi materiale, oltre agli atomi o molecole di base ne esistono di estranee, ossia che non dovrebbero far parte del materiale stesso ma invece presenti, si parla genericamente di *impurezze* o *impurità*. Se invece il materiale di base è volutamente ed artificialmente addizionato di elementi estranei, si parla di *drogaggio*. Drogare un materiale significa quindi aggiungere volutamente delle impurità per cambiare le proprietà elettriche del materiale stesso.

Il simbolismo che si adotta generalmente per raffigurare le cariche in un semiconduttore, mostra cariche fisse racchiuse da un cerchio, mentre quelle mobili sono riportate a fianco, come da figura.

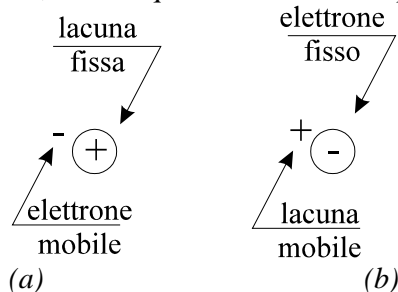


figura 3

Tale simbolismo risulta di grande aiuto nell'introdurre uno degli argomenti più importanti dell'elettronica: la giunzione *pn*. Quando in uno stesso cristallo semiconduttore, grazie a complessi processi tecnologici, si crea una transizione più o meno "brusca" (*abrupt*) da una zona drogata di tipo *n* ad una drogata di tipo *p*, si parla di giunzione *pn*.

Tale giunzione è schematicamente raffigurata in figura 4<sup>1</sup>, ove si sono inoltre riportati da un lato gli atomi donori (quindi con elettroni mobili e lacune fisse), dall'altro gli atomi accettori (quindi con lacune mobili ed elettroni fissi).

<sup>1</sup> Il disegno è necessariamente rappresentato non in scala, la larghezza della zona svuotata è quindi esagerata.

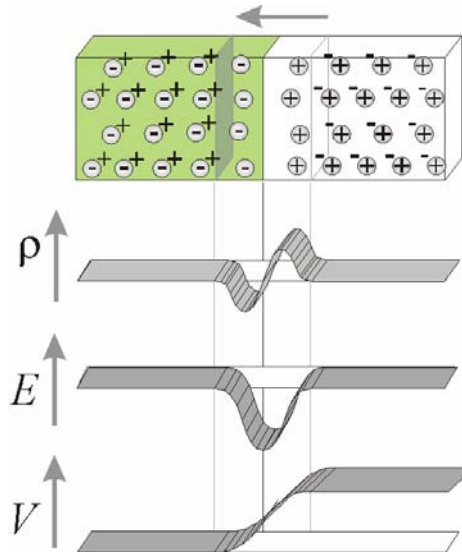


figura 4

La giunzione presenta però all'interfaccia una zona (identificata da due sezioni trasversali) in cui non compaiono le cariche mobili, ma soltanto quelle fisse. Ciò è dovuto alla ricombinazione (elettroni-lacune) delle cariche mobili che si trovavano a contatto. Infatti, essendosi verificato un gradiente di concentrazione di cariche, queste hanno "migrato" ricombinandosi (nasce una *corrente di diffusione* per la cosiddetta *legge di Fick*). Dato lo "svuotamento" di cariche mobili, la zona interessata prende appunto nome di *zona svuotata*. Nel resto del materiale questa ricombinazione non è potuta avvenire per una causa fondamentale che è importante analizzare. Per ogni carica mobile "migrata" è rimasta nel materiale una carica fissa di segno opposto. La somma di tutte le cariche fisse (che sono di segno positivo da un lato della giunzione, negativo dall'altro), dà luogo ad un campo elettrico  $\bar{E}$  il quale si oppone a che il fenomeno continui interessando il resto del materiale e che quindi dà luogo ad una barriera detta appunto *barriera di giunzione*. Il campo elettrico  $\bar{E}$  nasce quindi per costruzione stessa della giunzione, per questo prende nome di campo elettrico di *built-in* (ossia di costruzione), così come è pure definito il potenziale elettrico ad esso associato: *potenziale di built-in*.

### 1.1.2. Campo elettrico di built-in

Se la regione di svuotamento è priva di cariche mobili:

- Nella regione p densità di carica fissa pari a  $q \cdot NA$
- Nella regione n densità di carica fissa pari a  $q \cdot ND$

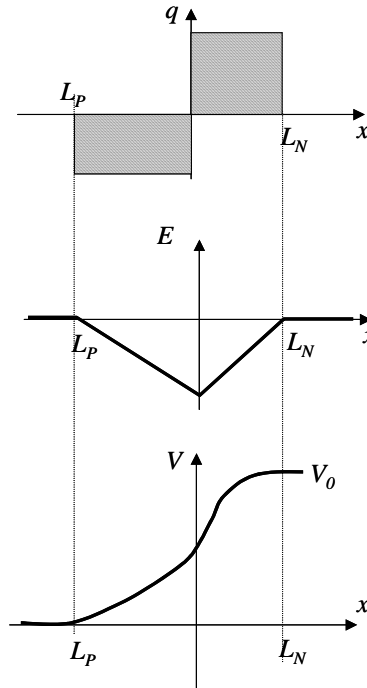


Figura 5

Dall'equazione di Poisson:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} \Rightarrow \begin{cases} \int_0^{E_0} dE = \int_{L_N}^0 \frac{q \cdot N_D}{\epsilon} dx \\ \int_{E_0}^0 dE = \int_0^{-L_P} \frac{-q \cdot N_A}{\epsilon} dx \end{cases}$$

$$E_0 = -\frac{q \cdot N_A}{\epsilon} L_P = -\frac{q \cdot N_D}{\epsilon} L_N$$

Da cui:

$$L = L_N + L_P = \frac{\epsilon \cdot |E_0|}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)$$

$$V(x) = -\int E \cdot dx \Rightarrow V_0 = -\frac{E_0}{2} (L_P + L_N)$$

### 1.1.3. Larghezza della zona di svuotamento

$$E_0 = -\frac{q \cdot N_A}{\epsilon} L_P = -\frac{q \cdot N_D}{\epsilon} L_N$$

$$L = L_N + L_P = \frac{\epsilon \cdot |E_0|}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right); \quad \text{considerando } |E_0| = 2 \frac{V_0}{L}$$

si ottiene

$$L = \sqrt{2 \frac{\epsilon \cdot V_0}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right)}$$

esempio :

$$N_A = N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \Rightarrow L = L_P = L_N = 0.073 \mu\text{m}$$

$$N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}; N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \Rightarrow L_P = 0.003 \mu\text{m}; L_N = 0.323 \mu\text{m};$$

### 1.1.4. Curve caratteristiche

#### Polarizzazione

La tensione (detta di *polarizzazione*) che esternamente si applica ad una giunzione *pn* può, in funzione della sua direzione, generare un campo elettrico che va a sommarsi o a sottrarsi a quello ( $E_{built-in}$ ) stabilitosi per costruzione. Il risultato è un allargamento o un ridimensionamento della barriera: si è nel primo caso in *polarizzazione inversa* mentre nel secondo in *polarizzazione diretta*.

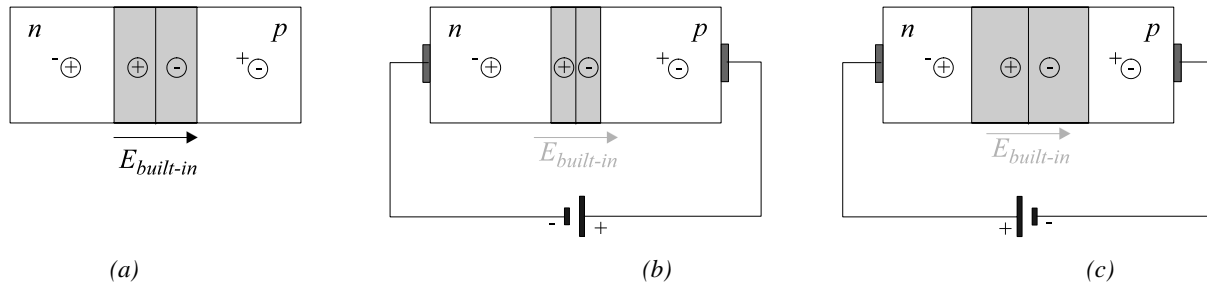


figura 6: (a) barriera di giunzione, (b) polarizzazione diretta, (c) polarizzazione inversa

#### Polarizzazione diretta

**CASO IDEALE:** Il campo elettrico generato dalla batteria contrasta quello di built-in. Via via aumentando la tensione fornita dalla batteria, si otterrà una restrizione sempre maggiore della zona svuotata, fino ad una sua totale scomparsa. A questo punto, in assenza di una barriera, i portatori maggioritari (elettroni nella zona *n*, lacune nella zona *p*) potranno circolare nel circuito dando luogo ad una corrente che potrà aumentare linearmente al crescere della tensione applicata grazie alla batteria. Esisterà quindi un valore di tensione, detta di *soglia* ( $V_\gamma$ ) che la batteria dovrà fornire solo per contrastare la barriera, da quel valore in poi all'aumentare della tensione corrisponderà un aumento della corrente nel circuito.

**CASO REALE:** Il discorso fin qui fatto è, in effetti, una schematizzazione di quel che in realtà accade, che porta ad un andamento *ideale* delle curve caratteristiche del diodo. Non esiste però un valore esatto di tensione applicata che comporti l'inizio di passaggio della corrente. Già in condizioni di barriera di giunzione sufficientemente stretta, alcuni portatori maggioritari potranno

statisticamente avere un valore di energia sufficiente ad oltrepassarla. Minore sarà la larghezza di barriera e maggiore sarà il numero di questi portatori.

Inoltre, nella pratica, la barriera di potenziale di built-in non raggiungerà mai lo zero, anche se potrà avere un valore trascurabile. Questo poiché parte della tensione applicata, all'aumentare della corrente nel diodo sarà, per caduta ohmica, non più sulla barriera ma nelle regioni  $p$  ed  $n$ .

Tutto ciò comporta un andamento della corrente in funzione della tensione applicata che è del tipo di quello illustrato in figura:

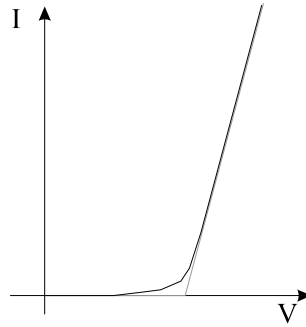


figura 7

In questa figura appare l'andamento ideale, rappresentato in colore grigio, e l'andamento reale, rappresentato in nero. E' evidente che i due andamenti si discostano al momento di transizione dalla situazione di corrente nulla a quella di corrente lineare con la tensione. La pendenza della retta asintoto è funzione della resistenza, e quindi del drogaggio, del materiale.

La tensione di soglia  $V_\gamma$ , già considerata per il caso ideale, in pratica assume il significato del valore di tensione diretta che occorre applicare affinché il diodo conduca almeno una corrente pari all'1% di quella massima sopportata prima della rottura del dispositivo. Si tende quindi a dare a  $V_\gamma$  significato di quella tensione che, nella pratica, bisogna fornire al diodo prima dell'inizio della sua conduzione: da qui il nome di tensione "di soglia". Valori tipici di  $V_\gamma$  sono di 0.2V per il germanio e di 0.6-0.7V per il silicio.

Per talune applicazioni circuitali è conveniente adottare la caratteristica ideale (detta *lineare a tratti* date le sue peculiarità) che, a fronte di approssimazioni, può comportare risultati comunque accettabili e una più agevole trattazione matematica.

### Polarizzazione inversa

La figura 6c mostra la situazione di polarizzazione inversa. Si ha, in questo caso, il morsetto positivo della batteria collegato alla zona drogata  $n$  del diodo, mentre quello negativo collegato alla zona  $p$ . Questo tipo di polarizzazione comporta un campo elettrico dovuto alla batteria nella stessa direzione di quello di built-in, conseguendone un allargamento della regione svuotata, quindi una maggiore barriera ai portatori maggioritari.

Fin qui si è parlato di corrente dovuta a portatori "maggioritari". In effetti, secondo la legge di azione di massa, in un semiconduttore, ad es., drogato  $n$ , esistono anche dei portatori "minoritari" ossia lacune che, seppur in numero di ordini di grandezza inferiore a quello degli elettroni, sono disponibili per la conduzione. Per avere un'idea delle grandezze in gioco, possiamo considerare, ad es., silicio drogato da arsenico con  $n=10^{16}$  elettroni/cm<sup>3</sup>. Dato che, a temperature ambiente,  $n_{i,Si}=1.45 \cdot 10^{10}$  portatori/cm<sup>3</sup>, si avrà una densità di lacune pari a  $p=n_i^2/n=2.1 \cdot 10^4$  cm<sup>-3</sup>. Tale numero, seppur molto inferiore a quello degli elettroni, non è comunque nullo, comportando quindi una corrente, anche se molto piccola, di portatori minoritari.

Tutto ciò implica nel grafico della caratteristica corrente-tensione ( $I-V$ ), un valore di  $I$  molto piccolo, ma non nullo, per tensioni applicate negative, ossia per polarizzazioni inverse. La corrente

dei soli portatori minoritari, che prende nome di *corrente di saturazione inversa* ( $I_0$ ), è nel caso del germanio dell'ordine dei  $\mu\text{A}$ , mentre nel caso del silicio dei  $\text{nA}$ .

### Caratteristica tensione-corrente

La figura che segue mostra l'andamento totale della caratteristica del diodo, comprendendo sia la zona di polarizzazione diretta, che quella di polarizzazione inversa.

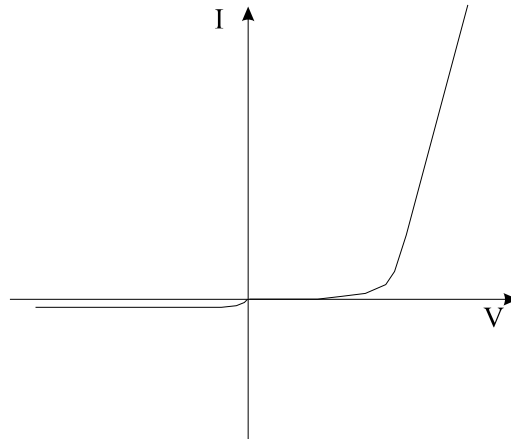


figura 8

Si noti comunque che, per far apprezzare l'andamento della corrente di portatori minoritari si è dovuto costruire un grafico in figura 8, con due differenti scale. Se così non fosse stato, i valori di corrente nel III quadrante sarebbero sembrati nulli.

L'equazione matematica corrispondente alla curva caratteristica del diodo è:

$$I = I_0 \left[ e^{\left( \frac{V}{\eta V_T} \right)} - 1 \right] \quad (\text{eq. 1-1})$$

in cui:  $I_0$  = corrente di saturazione inversa;

$V$  = tensione applicata;

$\eta$  = parametro funzione del tipo di semiconduttore che si considera  
(vale 1 per il Ge, circa 2 per il Si);

$V_T$  = equivalente in volt della temperatura<sup>2</sup>. A temperatura ambiente ( $T=300\text{K}$ )  $V_T \cong 26\text{mV}$ .

Il diodo ha quindi una caratteristica tale per cui analizzandolo con un tester, si ottiene una bassissima resistenza con i puntali applicati in modo da essere in polarizzazione diretta, mentre si nota una resistenza altissima scambiando i puntali.

In definitiva quindi il comportamento di un diodo semiconduttore a giunzione può essere riassunto come segue:

<sup>2</sup> La temperatura è un parametro fondamentale per conoscere il numero di portatori in banda di conduzione, ossia "disponibili" a creare un flusso di corrente. Applicare ad un semiconduttore una certa temperatura, è come sottoporlo ad una tensione ai suoi capi pari a  $V_T = \frac{kT}{q} = \frac{T}{11600}$ , con  $k$ =costante di Boltzmann e  $q$ =carica dell'elettrone.

- 1) esso è in conduzione quando è polarizzato in verso diretto; alla conduzione di corrente in diretta è associata una caduta di tensione;
- 2) esso presenta una corrente di perdita molto bassa in condizioni di polarizzazione inversa, fino a qualche nanoampère.

Nella regione con polarizzazione inversa, per una tensione inversa sufficientemente negativa, il contributo del termine  $(\exp(qV/nKT))$  diventa trascurabile rispetto al termine  $(-1)$ . In questa ipotesi la corrente  $I$  diventa pari a  $I_s$ . Per una tensione di polarizzazione diretta ( $V$  positiva), maggiore di 120 mV, il termine  $(-1)$  contribuisce per meno dell'1% e, per questo motivo, fa comodo ometterlo, in modo da descrivere la regione di polarizzazione diretta con la relazione approssimata seguente:

$$I = I_s \exp(qV/KT)$$

La natura esponenziale della caratteristica diretta ci consente di calcolare come varia la tensione diretta aumentando o diminuendo di un certo rapporto la corrente diretta. Due rapporti utili sono rappresentati dall'ottava (fattore 2 od  $1/2$ ) e la decade (fattore 10 od  $1/10$ ).

Date due correnti  $I_1$  ed  $I_2$  esistono due tensioni corrispondenti  $V_1$  e  $V_2$ , sulla base della relazione 3. Esse sono:

$$I_1 = I_s \exp(qV_1/KT) \qquad I_2 = I_s \exp(qV_2/KT)$$

Quindi si può scrivere:

$$I_2/I_1 = \exp(q(V_2 - V_1)/KT); \qquad 4)$$

ovvero:  $V_2 - V_1 = KT/q \ln(I_2/I_1)$

Se  $I_2 = 2 I_1$  (relazione di ottava), per  $T = 300$  K, si ha:

$$V_2 - V_1 = KT/q \ln 2 = 17.3 \text{ mV}$$

Notare che non dobbiamo necessariamente conoscere il valore di  $I_s$  per calcolare l'aumento della tensione diretta. Ma se dobbiamo calcolare la tensione diretta allora è necessario conoscere la  $I_s$ .

Questo implica che l'aumento della corrente diretta di un fattore 2 provoca l'aumento della caduta di tensione diretta di 17.3 mV, indipendentemente da  $I_s$ , e del reale valore della corrente. Tutto ciò naturalmente in prima approssimazione, cioè trascurando il termine  $(-1)$  nella equazione del diodo. Altra considerazione attiene il fatto che la variazione della tensione che si sviluppa ai capi del diodo risulta essere proporzionale alla temperatura assoluta. Se  $I_2 = 0.5 I_1$ , la caduta di tensione diretta ai capi del diodo si riduce di 17.3 mV.

Invece per un aumento di un fattore 10 della corrente, cioè se  $I_2 = 10 I_1$ , allora:

$$V_2 - V_1 = kT/q \ln 10 = 57,6 \text{ mV} \text{ alla temperatura di } 290 \text{ K, mentre per una diminuzione della corrente di una decade, ossia per } I_2 = 0.1 I_1, \text{ si ottiene che } V_2 - V_1 = - 57.6 \text{ mV.}$$

Una conseguenza dell'andamento fortemente crescente della caratteristica diretta è che la conduzione è bassa fino ad una tensione di circa 0.5 V (per un diodo al silicio). Per tensioni superiori la corrente cresce molto più rapidamente: attorno a circa 0.7 si verifica solamente un leggero aumento della tensione diretta, per i normali valori delle correnti di funzionamento. Se si presenta la caratteristica di un diodo in scala logaritmica si può notare una retta con pendenza di circa 60 mV per decade.

La dipendenza dalla temperatura della caratteristica del diodo può essere evidenziata considerando la relazione seguente:



$$V = KT/q \ln(I/I_s)$$

Poichè si è detto che  $I_s$  aumenta con la temperatura, al fine di mantenere costante la corrente diretta, la tensione  $V$  deve diminuire, all'aumentare della temperatura. Perciò la caduta di tensione diretta presenta un coefficiente di temperatura negativo di circa  $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ . Questo valore può sembrare basso, ma tenendo conto di una escursione della temperatura di 100 gradi, esso dà luogo ad una variazione di tensione di 200 mV, certamente una frazione considerevole della normale caduta di tensione diretta.

### 1.2. Modelli per il diodo: modello DC

L'equazione del diodo a causa della sua natura esponenziale non è di semplice utilizzazione nell'analisi e nel progetto di circuiti. E' quindi di notevole utilità tenere conto di una approssimazione della caratteristica, che possa offrire un andamento sufficientemente accurato del comportamento del dispositivo. Nei circuiti alimentati con tensioni relativamente alti, ritenere il diodo ideale (tensione di soglia nulla, corrente di saturazione inversa trascurabile) porta ad un errore trascurabile. In generale per tensioni al di sotto di 5-7 volt, è opportuno considerare cadute di tensione di soglia di circa  $0.7 \text{ V}$ , mentre è ancora possibile trascurare il valore della corrente inversa.

### 1.3. Resistenza dinamica del diodo

A causa della curvatura variabile della caratteristica del diodo, la tangente alla curva dipende dal punto di lavoro, cioè dalle coordinate  $I, V$  di tale punto. Il reciproco della pendenza della caratteristica del diodo ( $dI/dV$ ) viene detta resistenza dinamica ( $r_d$ ). Partiamo dalla relazione caratteristica del diodo:

$$I = I_s \exp(qV/KT)$$

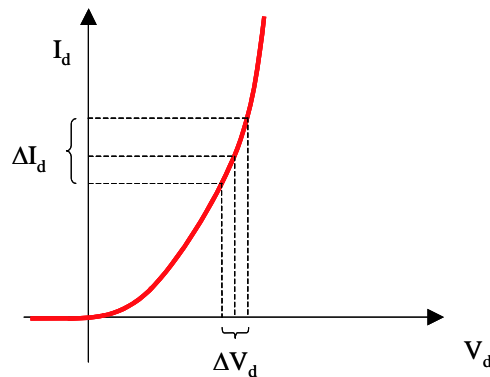


Figura 9

Differenziando si ha

$$dI = q/KT I_s \exp(qV/KT) dV = (q/KT) I dV$$

$$r_d = dV/dI = KT/qI$$

5

Il termine  $KT/q$  è pari a circa  $25 \text{ mV}$  a temperatura ambiente, per cui la resistenza dinamica può essere espressa nel seguente modo:

$$r_d = 0.025/I \text{ } [\Omega] \text{ ( I in A ) ; oppure } r_d = 25/I \text{ } [\Omega] \text{ ( I in mA)}$$

Questa ultima relazione dimostra come la resistenza dinamica sia dipendente dalla corrente continua di polarizzazione.

Il comportamento del diodo in polarizzazione diretta nei confronti dei piccoli segnali, cioè di variazioni di corrente o di tensione così piccole da ritenere la  $r_d$  costante, può essere rappresentato da un circuito come quello di figura in cui  $C_d$  è la capacità di diffusione. In condizioni di polarizzazione inversa il circuito equivalente prevede una resistenza differenziale inversa così alta da potersi ritenere trascurabile e da una capacità di transizione relativa alla regione di carica spaziale in inversa.

## 2. Circuiti a diodi

### 2.1. Raddrizzatore 1 semionda

Si definisce circuito *raddrizzatore* quello che consente il passaggio di corrente in una sola direzione. In particolare per il *raddrizzatore ad una semionda* lo schema circuitale e le relative forme d'onda di ingresso e di uscita sono riportate nelle figure a seguire.

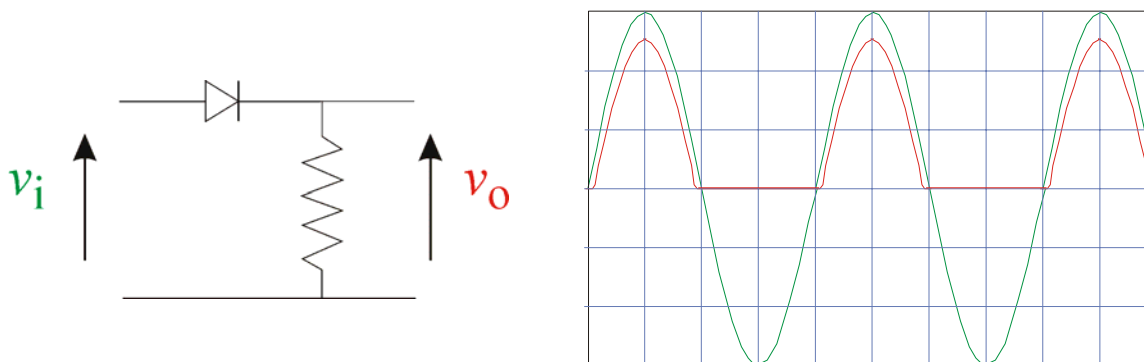
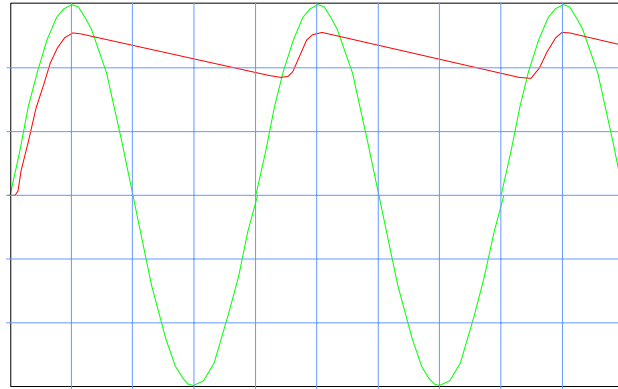
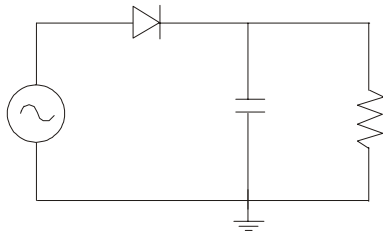


Figura 10

Ponendo in ingresso a tale circuito una forma d'onda sinusoidale a valor medio nullo, si avrà in uscita una forma d'onda privata della componente negativa (quindi *unidirezionale*), a valor medio non nullo e con la caratteristica di essere in ritardo rispetto all'inizio della forma d'onda di ingresso ed in anticipo rispetto alla fine. Questo comportamento è dovuto al diodo che consente il passaggio di corrente solo in polarizzazione diretta e solo dopo che il valore di tensione positiva di ingresso supera il valore di soglia "di innesco"  $V_\gamma$ .

### 2.2. Raddrizzatore con filtro capacitivo

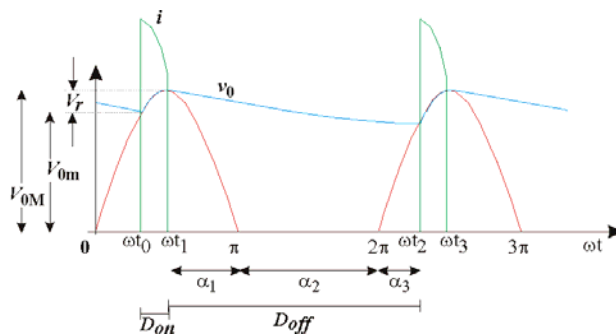
Il segnale di uscita del circuito *raddrizzatore ad una semionda* è periodico ma con componente continua non nulla. In molti circuiti di interesse pratico, risulta utile poter ottenere da un segnale periodico un nuovo segnale costante utile a polarizzare taluni componenti circuitali. Il segnale di uscita di un *raddrizzatore ad una semionda* potrebbe risultare utile allo scopo, se opportunamente filtrato delle componenti diverse dalla continua (praticamente grazie ad un opportuno filtraggio di tipo *passa-basso*). Per questo si utilizza una configurazione circuitale che aggiunge un condensatore in parallelo alla resistenza di uscita. Quest'ultima, in realtà, rappresenta l'equivalente di una resistenza di un ipotetico circuito da alimentare.



Lo studio di questo circuito lo si può dividere tra il tempo di conduzione del diodo ed il tempo in cui il diodo è interdetto. Se ammettiamo l'ipotesi semplificativa di  $V_f=0$ , il diodo consente il passaggio di corrente, e quindi la carica del condensatore, durante tutta la semionda positiva del segnale di ingresso a derivata positiva. Se il tempo di scarica del condensatore sarà più lento del tempo di discesa del segnale di ingresso, il diodo verrà interdetto, staccando di fatto il carico dall'alimentazione. A questo punto sarà il condensatore ad alimentare il carico e non più l'ingresso, questo finché la nuova semionda positiva della tensione di ingresso non supererà il valore di tensione a cui si è nel frattempo portata la capacità, come da figura a seguire.

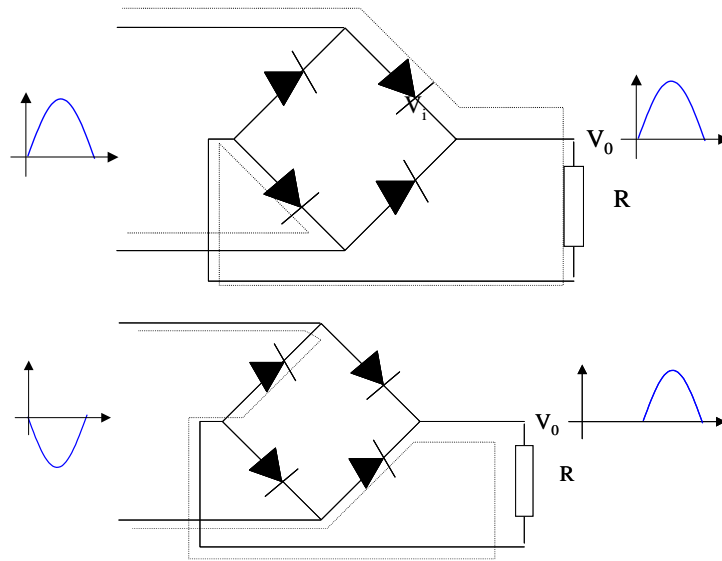
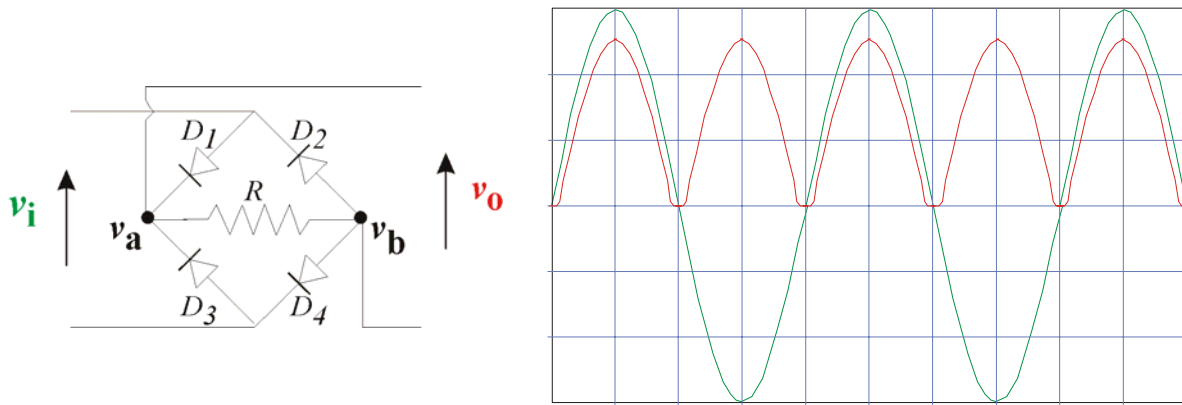
Volendo un valore di tensione di uscita costante, dovremmo avere uguali i valori di  $V_{0M}$  e  $V_{0m}$  riportati in figura. Nella pratica potremmo ammettere una piccola differenza tra i due detta *ripple*:

$$V_R = V_{0M} - V_{0m}$$



### 2.3. Ponte di diodi (graetz)

Il *ponte di diodi* è fondamentalmente un circuito *raddrizzatore completo* (a due semionde). Durante la semionda positiva del segnale di ingresso, una volta superato il valore "di innesco" ( $2V_f$ ) dei due diodi  $D_1$  e  $D_4$ , il segnale di uscita, prelevato ai capi della resistenza e pari a  $v_0 = (v_a - v_b)$ , sarà positivo ed avrà lo stesso andamento del segnale di ingresso. Quando invece il segnale di ingresso assume valori negativi condurranno i diodi  $D_2$  e  $D_3$ , per cui il potenziale  $v_b$  sarà inferiore a quello di  $v_a$  fornendo un valore del segnale di uscita ancora positivo, come riportato nella figura.



Da sottolineare come i segnali di ingresso ed uscita non hanno, come solitamente accade, un terminale in comune (che tipicamente è quello di massa). Il terminale di riferimento del segnale di ingresso deve essere isolato dal terminale di riferimento del segnale di uscita. Questo isolamento viene spesso ottenuto mediante l'uso di un idoneo trasformatore.