

DIODO E APPLICAZIONI

Indice generale

Diodo a semiconduttore.....	1
Curva caratteristica del diodo.....	2
Equazione caratteristica del diodo.....	2
Dipendenza dalla temperatura della curva caratteristica.....	3
Il diodo come elemento circuitale.....	3
Modelli approssimati del diodo.....	4
Modello di diodo ideale (diodo come interruttore o modello ON/OFF).....	4
Modello di diodo a caduta di tensione costante (diodo come batteria).....	5
Modello di diodo con circuito resistivo.....	5
Parametri dei diodi reali.....	6
Circuiti raddrizzatori.....	7
Circuito raddrizzatore ad una semionda.....	7
Circuito raddrizzatore a doppia semionda con trasformatore a presa centrale.....	8
Circuito raddrizzatore a doppia semionda a ponte di Graetz.....	9
Circuito raddrizzatore con filtro capacitivo.....	11
Diodi speciali.....	13
Diodi zener.....	13
Circuito stabilizzatore a diodo zener.....	14
Diodi schottky.....	15
Diodi varicap.....	15
Diodi LED.....	15
Fotodiodi.....	16
Appendice.....	17
Datasheet del diodo 1N4148.....	17
Valori e sigle commerciali dei diodi zener.....	19

Diodo a semiconduttore

Il diodo è un componente elettronico basato su una giunzione pn, il cui simbolo elettrico è mostrato nella figura 1. I due terminali del diodo, denominati **anodo** (A) e **catodo** (K) corrispondono rispettivamente alle zone con drogaggio p e n della giunzione.

Nella figura 2 sono invece illustrate le convenzioni di segno di tensione e corrente: la tensione è considerata positiva quando il terminale a potenziale più alto è l'anodo, mentre la corrente è considerata positiva se entrante nell'anodo.

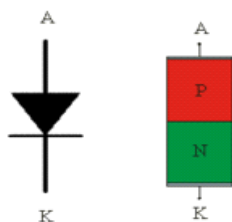


figura 1 - simbolo del diodo e corrispondenza con la giunzione pn

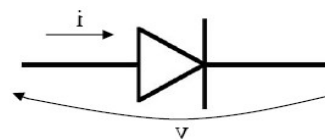
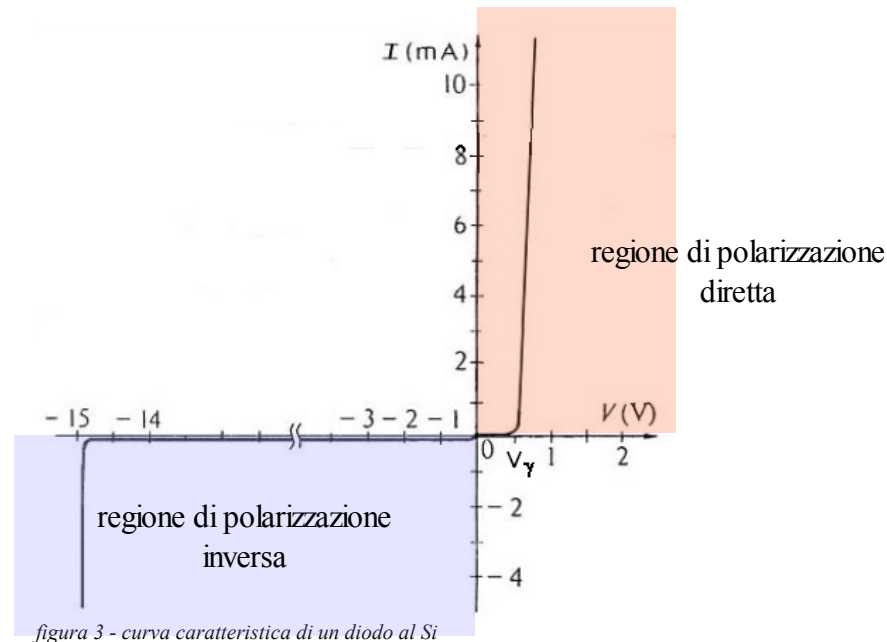


figura 2 - convenzioni di segno per il diodo

Curva caratteristica del diodo

Il diodo è un componente non lineare. Il suo funzionamento può essere descritto mediante la sua curva caratteristica, un grafico che mostra l'andamento della corrente (I) al variare della tensione tra anodo e catodo (V):



- **Polarizzazione diretta**

Per tensioni V positive, la giunzione è polarizzata direttamente e si ha il passaggio di corrente dall'anodo verso il catodo (corrente diretta o *forward current*). In particolare, per valori di V inferiori alla cosiddetta **tensione di soglia V_γ** la corrente attraverso il diodo è ancora trascurabile, mentre per valori di V superiori alla tensione di soglia il diodo conduce apprezzabilmente e la corrente diretta cresce esponenzialmente con la tensione. In figura è rappresentato il tratto iniziale della caratteristica diretta: la curva ha un andamento quasi verticale ovvero l'aumento di corrente è molto forte mentre la tensione ai capi del diodo si mantiene pressapoco attorno al valore V_γ .

Il valore della tensione di soglia dipende dalle proprietà fisiche del diodo: nel caso di un diodo al silicio essa vale generalmente $V_\gamma = (0,5 \div 0,8)V$.

- **Polarizzazione inversa**

Per tensioni V negative, la giunzione è polarizzata inversamente e il diodo non conduce. In effetti vi è una debole corrente diretta dal catodo verso l'anodo (corrente inversa o *reverse current*), causata dalla deriva dei portatori minoritari; tale corrente, detta **corrente di saturazione inversa I_0** è molto piccola ed è rilevabile sulla caratteristica solo utilizzando una scala espansa.

Per un dato valore di tensione negativa, di solito dell'ordine delle decine o centinaia di volt, si verifica la "rottura" (*breakdown*) della giunzione che non è più in grado di bloccare la corrente inversa cosicché essa comincia a fluire con un aumento molto rapido.

Equazione caratteristica del diodo

Il funzionamento del diodo può essere espresso anche in forma matematica per mezzo dell'equazione caratteristica. La corrente che circola nel diodo può essere calcolata come:

$$i = I_0 \left(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1 \right)$$

equazione 1

dove:

I_0 è la corrente di saturazione inversa

V è la tensione ai capi del diodo

η è un fattore che può variare tra 1 e 2 (1=diode ideale)

$V_T = T/11600$ è un parametro denominato **tensione termica** che dipende dalla temperatura (espressa in °K) e a temperatura ambiente vale $V_T \approx 26mV$

In particolare, per il diodo ideale ($\eta=1$) e per tensioni dirette $V \gg V_T$, all'interno della parentesi risulta $e^{\frac{V}{V_T}} \gg 1$ pertanto il termine -1 può essere trascurato e si può scrivere:

$$i = I_0 \cdot e^{\frac{V}{V_T}} \quad \text{confermando la dipendenza esponenziale della corrente diretta dalla tensione applicata al diodo}$$

Dipendenza dalla temperatura della curva caratteristica

A parità di tensione applicata, la corrente nel diodo varia anche con la temperatura a causa di due effetti contrapposti:

- la corrente di saturazione inversa I_0 aumenta con la temperatura in quanto all'aumentare della temperatura cresce la concentrazione di portatori minoritari all'interno della giunzione; questo provoca un aumento della corrente i
- la tensione termica aumenta con la temperatura facendo diminuire il fattore esponenziale dell'equazione caratteristica e quindi provocando una diminuzione della corrente i

L'effetto netto risultante da questi due fenomeni è un aumento complessivo della corrente diretta al crescere della temperatura, ovvero la curva caratteristica tende a spostarsi come illustrato nella figura 4.

Tale variazione della curva caratteristica può essere equivalentemente descritta dicendo che polarizzando un diodo a corrente costante, un aumento della temperatura corrisponde ad una diminuzione della tensione ai capi del diodo. Da un punto di vista quantitativo un incremento di un grado della temperatura assoluta corrisponde a una diminuzione di $\sim 2,5\text{mV}$ della tensione V ai capi del diodo .

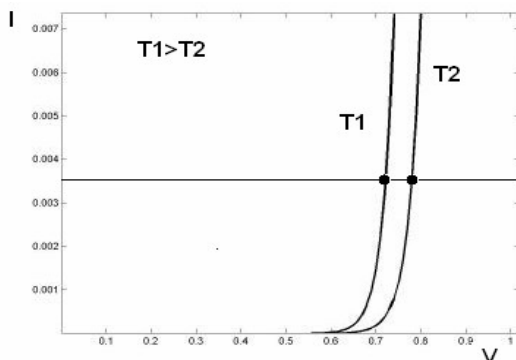


figura 4 - dipendenza dalla temperatura della curva caratteristica

$$\frac{dV}{dT} \approx -2,5 \text{ mV} / ^\circ\text{C}$$

Il diodo come elemento circuitale

Si consideri il semplice circuito di figura 5, in cui un diodo viene polarizzato direttamente mediante un generatore di tensione di fem E . Una resistenza R viene posta in serie al diodo con lo scopo di limitare la corrente.

Quando un diodo è inserito in un circuito, è importante determinare le condizioni di lavoro del diodo stesso, ovvero la corrente che scorre nel diodo (I) e la tensione ai suoi capi (V). A tale scopo si consideri che i valori I e V devono soddisfare le seguenti condizioni:

1. devono appartenere alla curva caratteristica del diodo, data in forma grafica (figura 3) o sotto forma di modello matematico (equazione 1).
2. devono altresì soddisfare l'equazione del circuito, ovvero l'equazione alla maglia ricavabile applicando il secondo principio di Kirchhoff:

$$E = R \cdot I + V$$

Per ricavare i valori di I e V si può dunque procedere per via matematica, risolvendo il sistema costituito

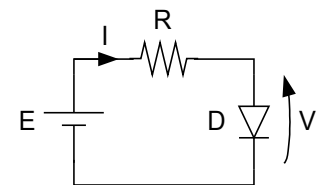


figura 5 - circuito fondamentale con diodo

dall'equazione 1 e dall'equazione alla maglia appena scritta; tuttavia la risoluzione è particolarmente complessa, a causa del carattere esponenziale dell'equazione 1. Si preferisce quindi procedere per via grafica, determinando l'intersezione tra la curva caratteristica del diodo e la retta che corrisponde alla rappresentazione grafica dell'equazione alla maglia. Tale procedimento prende il nome di **metodo della retta di carico**:

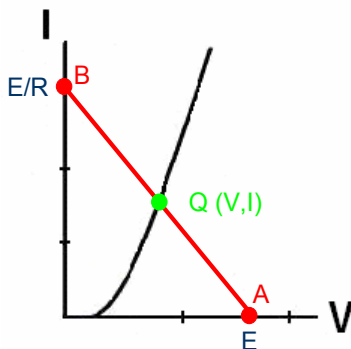


figura 6 - retta di carico e punto di lavoro del diodo

Nel grafico a fianco sono riportati:

- in nero, la curva caratteristica del diodo
- in rosso, la retta che rappresenta l'equazione alla maglia e che può essere facilmente disegnata determinando le intersezioni con gli assi
 - intersezione con l'asse V (punto A): l'equazione dell'asse è $I=0$; sostituendo tale valore nell'equazione alla maglia si ottiene $E=R*0+V$ ovvero $V=E$ che corrisponde al punto A sul grafico
 - intersezione con l'asse I (punto B): l'equazione dell'asse è $V=0$; sostituendo tale valore nell'equazione alla maglia si ottiene $E=R*I+0$, ovvero $I=E/R$ che corrisponde al punto B sul grafico

Il punto di intersezione tra le due curve, Q, individua il **punto di lavoro** (o **punto di funzionamento**) del diodo. Le sue coordinate V,I rappresentano i valori di tensione e corrente cercati.

Il metodo grafico permette l'analisi del circuito con diodo di figura 5, tuttavia presenta alcuni inconvenienti:

- richiede la disponibilità della curva caratteristica del diodo, che non sempre è nota
- non è immediato, perché richiede la costruzione della retta di carico
- la precisione dei risultati è limitata, perché legata all'accuratezza con cui si costruisce e si interpreta il disegno

Per superare tali inconvenienti si preferisce ricorrere a dei **modelli** che rappresentano il funzionamento del diodo in forma semplificata e che permettono una più agevole analisi dei circuiti a diodi.

Modelli approssimati del diodo

Esistono diversi modelli circuitali del diodo che si distinguono per il grado di approssimazione più o meno marcata che introducono. Tutti questi modelli riducono la curva caratteristica del diodo ad una spezzata costituita da tratti lineari. L'uso dei modelli permette un'analisi quantitativa più immediata dei circuiti a diodi e una loro più rapida risoluzione anche se possono portare a risultati meno precisi. Tuttavia gli errori che si commettono sono in genere accettabili e diventano trascurabili quando si trattano segnali sufficientemente ampi.

Modello di diodo ideale (diodo come interruttore o modello ON/OFF)

Il modello più semplice considera il diodo in polarizzazione inversa come un *circuito aperto* e il diodo in polarizzazione diretta come un *corto circuito*:

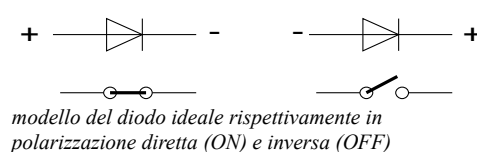
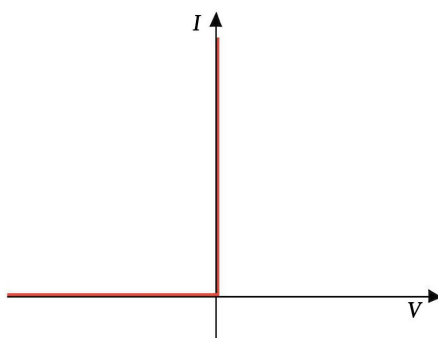


figura 7 - caratteristica del diodo ideale

Confrontando la caratteristica del modello ideale con la caratteristica reale di figura 3, si nota come questo modello trascuri sia la tensione di soglia che l'andamento esponenziale della caratteristica stessa.

Modello di diodo a caduta di tensione costante (diodo come batteria)

In questo caso il comportamento del diodo viene così descritto:

- in polarizzazione inversa o per tensioni dirette inferiori alla tensione di soglia il diodo non conduce e viene assimilato ad un *circuito aperto*;
- in polarizzazione diretta il diodo conduce e la caduta di tensione ai suoi capi viene assunta costante e pari alla tensione di soglia V_γ . In altre parole, il diodo polarizzato direttamente viene assimilato ad una batteria di valore V_γ con i terminali positivo e negativo corrispondenti rispettivamente all'anodo e al catodo;

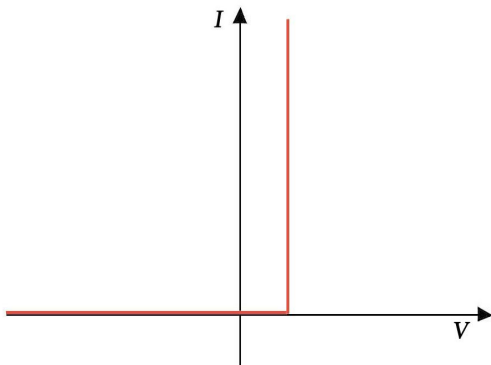
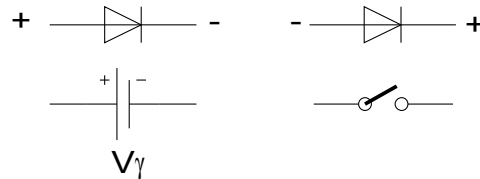


figura 8 - caratteristica del modello a caduta di tensione costante



modello del diodo a caduta di tensione costante rispettivamente in polarizzazione diretta (batteria) e inversa (OFF)

Questo modello si avvicina maggiormente al caso reale perché, a differenza del modello precedente, tiene conto della tensione di soglia del diodo.

Modello di diodo con circuito resistivo

Questo modello è quello che meglio approssima il comportamento del diodo reale, in quanto permette di considerare anche la variazione di tensione ai capi del diodo all'aumentare della corrente di conduzione. In questo modello:

- come nel modello precedente, il diodo polarizzato inversamente o con tensioni dirette inferiori alla tensione di soglia non conduce e viene assimilato ad un *circuito aperto*;
- il diodo polarizzato direttamente viene assimilato ad una batteria di valore V_γ collegata in serie ad una resistenza r_d di piccolo valore. La caratteristica diretta viene quindi descritta dall'equazione:

$$V = V_\gamma + r_d \cdot I$$

equazione 2

dove, come detto, si tiene conto del fatto che all'aumentare di I anche V aumenta, anche se l'andamento esponenziale della caratteristica reale viene approssimato con una curva lineare.

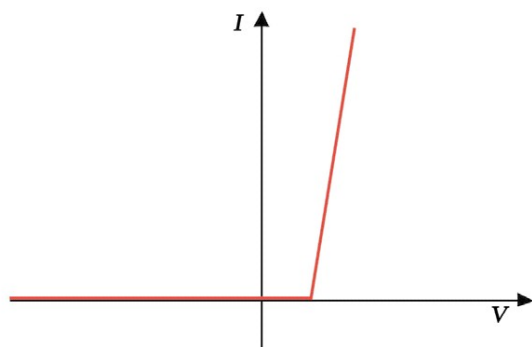
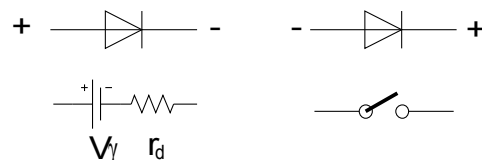


figura 9 - caratteristica del modello di diodo con circuito resistivo



modello del diodo con circuito resistivo rispettivamente in polarizzazione diretta (batteria + resistenza) e inversa (OFF)

Il parametro r_d viene detto **resistenza differenziale** ed è in relazione con la pendenza della retta inclinata nella curva caratteristica del modello. Come si può infatti ricavare facilmente dall'equazione 2, risulta:

$$\frac{\Delta I}{\Delta V} = \frac{1}{r_d} \quad \text{ovvero la pendenza della retta è uguale al reciproco della resistenza differenziale}$$

La resistenza differenziale può assumere valori compresi tra i centesimi di ohm e le decine di Ohm, a seconda del tipo di diodo; in ogni caso il suo valore può essere ricavato dai *data sheet* oppure dalla curva caratteristica, considerando l'approssimazione lineare.

Parametri dei diodi reali

Tra i diodi utilizzati con funzione raddrizzante, esistono diverse categorie di componenti:

- **diodi per uso generale** (*general purpose diode* o *small signal diode*) – adatti per applicazioni generiche e con segnali di limitata entità
- **diodi per commutazione** (*switching diode*) – utilizzati quando è richiesta una veloce commutazione tra gli stati ON e OFF
- **diodi raddrizzatori** (*rectifier diode*) – adatti per il raddrizzamento di tensioni anche di elevata entità

In tutti i casi, i principali parametri riportati dai *data sheet* sono:

- V_F tensione diretta (*forward voltage*) – valore tipico della tensione continua ai capi del diodo in conduzione, di solito specificato per un dato valore di corrente;
- $I_{F,AV}$ corrente diretta media (*average forward current*) – valore massimo della corrente diretta media
- I_{FRM} massima corrente diretta ripetitiva (*maximum repetitive forward current*) – valore massimo di corrente diretta di picco ripetitivo
- I_{FSM} massima sovracorrente diretta (*maximum forward surge current*) – valore massimo di corrente diretta di picco non ripetitivo
- I_R corrente inversa (*reverse current*) – corrente inversa, di solito specificato per alcuni valori di tensione inversa
- V_{RRM} massima tensione inversa ripetitiva (*maximum repetitive reverse voltage*) - valore massimo della tensione inversa che si presenta in modo ripetitivo
- V_{RSM} massima sovratensione inversa (*maximum reverse surge voltage*) - valore massimo della tensione inversa di picco non ripetitivo
- V_{BR} tensione di rottura (*breakdown voltage*) – valore di tensione a cui si verifica la rottura della giunzione
- T_j temperatura della giunzione (*junction temperature*) – temperatura massima che può essere raggiunta dalla giunzione
- P potenza (power) – potenza massima dissipabile dal diodo, di solito specificata alla temperatura di 25°C
- t_{rr} tempo di recupero inverso (*reverse recovery time*) – tempo impiegato dal diodo, sottoposto ad una commutazione istantanea, a passare dallo stato ON allo stato OFF; questo tempo è dovuto al fatto che nello stato ON sono presenti un certo numero di portatori minoritari all'interno della giunzione che devono essere “smaltiti” quando si inverte la polarizzazione della giunzione.

In appendice è riportato un estratto del *data sheet* del diodo 1N4148, da cui si possono ricavare i valori dei parametri descritti in precedenza per il diodo in oggetto.

Circuiti raddrizzatori

I circuiti raddrizzatori convertono una tensione alternata con valore medio nullo in una tensione ancora pulsante ma unipolare con valore medio diverso da zero.

La principale applicazione dei circuiti raddrizzatori è nella realizzazione degli alimentatori, di cui essi costituiscono un blocco fondamentale. Nei circuiti alimentatori, infatti, la tensione alternata di rete viene applicata ad un trasformatore che ne riduce l'ampiezza. Il segnale presente sull'avvolgimento secondario del trasformatore viene poi raddrizzato e successivamente livellato mediante un filtro; il segnale che così si ottiene, sostanzialmente costante, viene poi ulteriormente stabilizzato mediante un apposito circuito.

Per i circuiti raddrizzatori sono possibili diverse configurazioni, che vengono illustrate nei paragrafi seguenti. In particolare si distinguono le seguenti categorie:

- raddrizzatori ad una semionda – utilizzano una sola semionda della tensione sinusoidale d'ingresso, sopprimendo la semionda opposta
- raddrizzatori a doppia semionda – utilizzano entrambe le semionde della tensione sinusoidale d'ingresso, rovesciando la polarità di una delle due semionde.

Il processo di raddrizzamento a doppia semionda è in generale preferibile in quanto, riuscendo ad utilizzare completamente il segnale d'ingresso, risulta più efficiente.

Circuito raddrizzatore ad una semionda

Lo schema del raddrizzatore ad una semionda è riportato nella figura 10. Esso è costituito da un diodo e da una resistenza di carico R. La tensione applicata all'ingresso è un'onda sinusoidale $V_i = V_P \sin \omega t$, di ampiezza di picco V_P e frequenza $f = \frac{\omega}{2\pi}$, dove ω è la pulsazione del segnale.

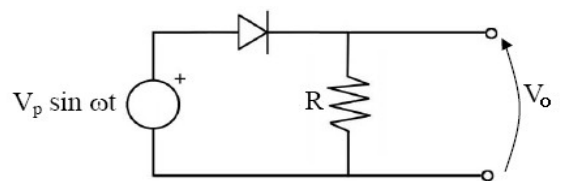


figura 10 - circuito raddrizzatore ad una semionda

Analizziamo il comportamento del circuito utilizzando, in prima approssimazione, il modello del diodo ideale. In tal caso:

- quando la tensione d'ingresso è $V_i > 0$ (semionde positive) \Rightarrow il diodo si polarizza direttamente e si comporta come un corto circuito. La tensione d'uscita vale $V_o = V_i$
- quando la tensione d'ingresso è $V_i < 0$ (semionde negative) \Rightarrow il diodo si polarizza inversamente e si comporta come un circuito aperto. La tensione d'uscita vale $V_o = 0V$

L'andamento dei segnali d'ingresso e d'uscita è riportato nella figura 11. Il circuito raddrizza il segnale eliminando le semionde negative e mantenendo in uscita solo quelle positive. In particolare, i parametri caratteristici del segnale d'uscita V_o sono:

valore massimo $V_{o,MAX} = V_P$

valore medio $V_{o,m} = \frac{V_P}{\pi}$

La corrente che scorre nel carico R (e nel diodo) $I(t) = \frac{V_o(t)}{R}$ ha

lo stesso andamento della tensione V_o e i suoi valori caratteristici sono:

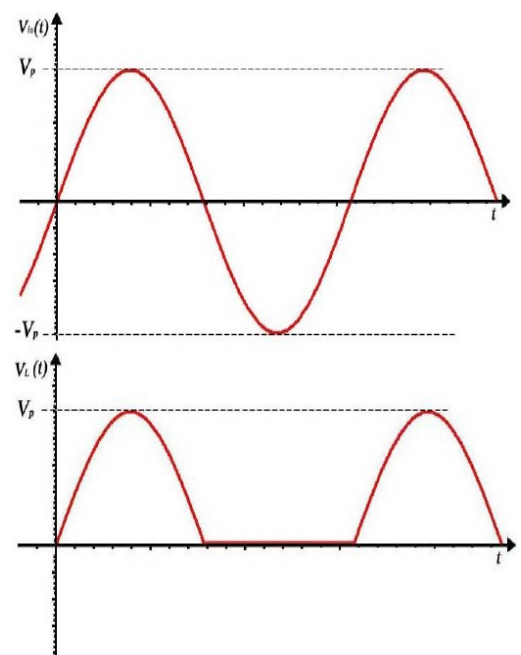


figura 11 - segnali d'ingresso e uscita del raddrizzatore ad una semionda (approssimazione diodo ideale)

valore massimo
$$I_{MAX} = \frac{V_P}{R} = I_{D,MAX}$$

valore medio
$$I_m = \frac{V_{o,m}}{R} = \frac{V_P}{\pi R} = I_{D,m}$$

Si noti inoltre come la massima tensione inversa applicata al diodo durante la semionda negativa del segnale d'ingresso sia $V_{R,MAX} = V_P$.

L'approssimazione di diodo ideale sin qui considerata è valida solo nell'ipotesi che la tensione di soglia del diodo sia trascurabile rispetto all'ampiezza V_P del segnale applicato in ingresso. In caso contrario, si deve rappresentare il diodo secondo il modello a caduta di tensione costante, pertanto:

- per valori della tensione d'ingresso $V_i < V_\gamma \Rightarrow$ il diodo si polarizza inversamente e si comporta come un circuito aperto. La tensione d'uscita vale $V_o = 0V$
- per valori della tensione d'ingresso $V_i > V_\gamma \Rightarrow$ il diodo si polarizza direttamente e il circuito equivalente del raddrizzatore diventa quello di figura 12. Dall'equazione alla maglia di tale circuito si ricava immediatamente $V_o = V_i - V_\gamma$. La forma d'onda d'uscita risulta quindi abbassata, rispetto al caso precedente, di una quantità V_γ , come mostrato nella figura 13. In questo caso il valore di picco del segnale d'uscita sarà pertanto $V_{o,MAX} = V_P - V_\gamma$.

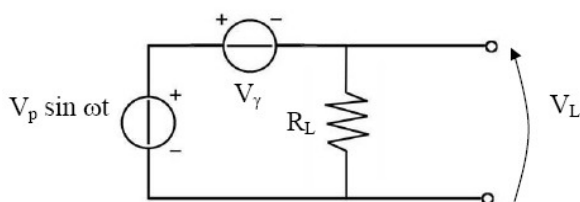


figura 12 - circuito equivalente del raddrizzatore a una semionda (modello del diodo a caduta di tensione costante)

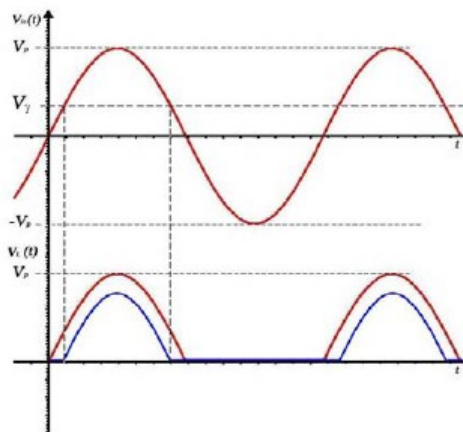


figura 13 - segnali d'ingresso e uscita del raddrizzatore a una semionda (in blu, caso del diodo a caduta di tensione costante)

Circuito raddrizzatore a doppia semionda con trasformatore a presa centrale

Lo schema di un raddrizzatore con trasformatore a presa centrale è riportato nella figura 14. In questo circuito, le tensioni ai capi di ciascun secondario del trasformatore sono uguali in modulo ma in opposizione di fase (i puntini in figura indicano i punti che sono in fase, ossia che hanno la stessa polarità).

Analizziamo il funzionamento del circuito:

- durante la semionda positiva del segnale d'ingresso, l'estremo superiore del primo avvolgimento secondario assume un potenziale positivo rispetto alla presa centrale, l'estremo inferiore del secondo avvolgimento secondario si trova a un potenziale negativo. In questa condizione il diodo D_1 conduce, mentre il diodo D_2 è interdetto. Nel carico R circola corrente I_1 nel verso indicato in figura.
- viceversa, durante la semionda negativa diventa positivo l'estremo inferiore del secondo avvolgimento secondario, pertanto D_2 conduce mentre D_1 è nello stato OFF. Nel carico circola corrente I_2 , ancora nello stesso verso in cui circolava nel caso precedente.

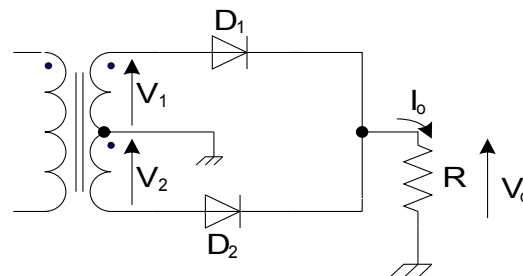


figura 14 - circuito raddrizzatore con trasformatore a presa centrale

Dall'analisi precedente si evince che nel carico circola corrente sia durante la semionda positiva che durante la semionda negativa, in entrambi i casi con lo stesso verso. La tensione V_o ai capi della resistenza assume pertanto la stessa polarità e, tralasciando le cadute di tensione sui diodi, coincide con la tensione ai capi dei due secondari.

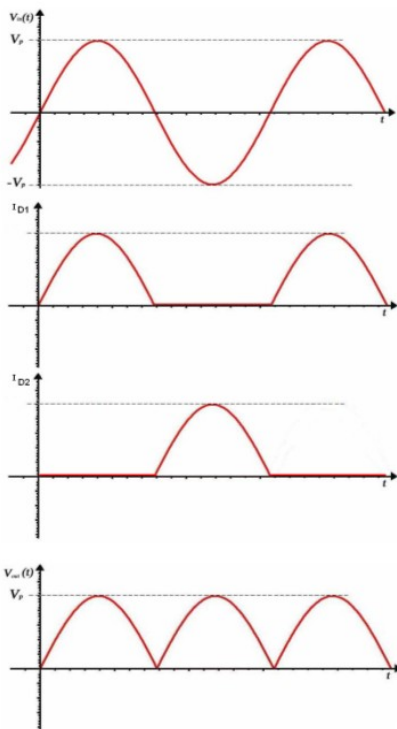


figura 15 - forme d'onda per il raddrizzatore a doppia semionda con trasformatore a presa centrale

Nella figura 15 sono mostrate le forme d'onda del segnale d'ingresso, delle correnti nei due diodi e della tensione d'uscita. Nell'ipotesi di diodi ideali, i valori caratteristici della tensione d'uscita sono:

valore massimo $V_{o,MAX} = V_P$

valore medio $V_{o,m} = \frac{2 \cdot V_P}{\pi}$

Si noti in particolare che, rispetto la caso precedente, il valore medio della tensione d'uscita è raddoppiato. Questo è abbastanza intuitivo, se si osserva che in questo caso in uscita sono presenti entrambe le semionde del segnale di partenza.

Per quanto riguarda i valori caratteristici della corrente nel carico

$$I_o(t) = \frac{V_o(t)}{R}, \text{ si ottiene:}$$

valore massimo $I_{MAX} = \frac{V_P}{R}$

valore medio $I_m = \frac{V_{o,m}}{R} = \frac{2 \cdot V_P}{\pi R}$

Infine, considerando che ciascun diodo conduce soltanto durante uno dei due semiperiodi, i parametri di lavoro di ogni diodo sono:

corrente diretta di picco $I_{D,MAX} = I_{MAX} = \frac{V_P}{R}$

corrente diretta media $I_{D,m} = \frac{I_{MAX}}{\pi} = \frac{V_P}{\pi R}$

tensione inversa di picco $V_{R,MAX} = 2 \cdot V_P$

Circuito raddrizzatore a doppia semionda a ponte di Graetz

Il circuito raddrizzatore a doppia semionda più usato è in realtà quello a ponte di Graetz, il cui schema è riportato in figura 16. Esso consiste di 4 diodi disposti a ponte: su una diagonale è disposta l'alimentazione mentre sull'altra è inserito il carico.

Supponendo i diodi ideali il funzionamento del circuito è il seguente:

- durante la semionda positiva del segnale d'ingresso, il terminale superiore della diagonale di alimentazione ha polarità positiva, mentre quello inferiore ha polarità negativa. In questo caso i diodi D_2 e D_4 sono polarizzati direttamente mentre i diodi D_1 e D_3 sono polarizzati inversamente e nel circuito circola corrente secondo il percorso indicato in figura 17; si noti in particolare come la corrente entri nel carico R dal terminale superiore.
- durante la semionda negativa del segnale d'ingresso, si ha la situazione opposta: le polarità dei terminali di alimentazione si invertono e i diodi D_1 e D_3 sono polarizzati direttamente mentre i diodi D_2 e D_4

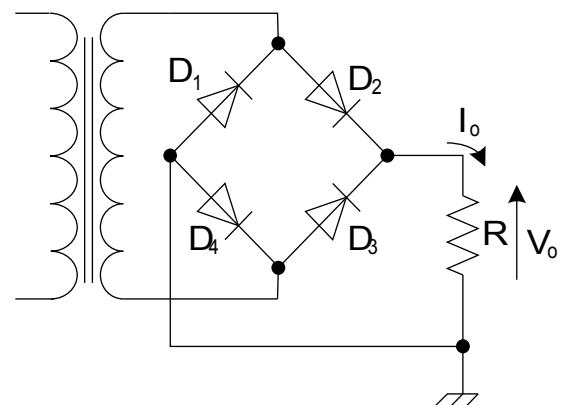


figura 16- raddrizzatore a doppia semionda a ponte di Graetz

D_4 sono polarizzati inversamente; la corrente nel circuito segue ora il percorso indicato in figura 18, entrando anche in questo caso nel carico dal terminale superiore.

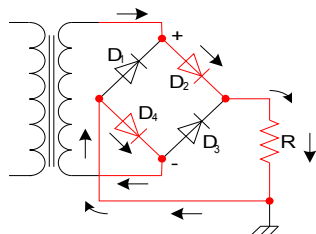


figura 17 - percorso della corrente durante la semionda positiva

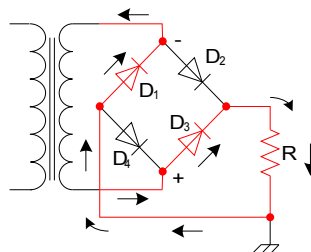


figura 18 - percorso della corrente durante la semionda negativa

Dall'analisi precedente si deduce che nel carico si ha passaggio di corrente durante entrambe le semionde e poiché tale corrente scorre sempre nello stesso verso, la tensione d'uscita $V_o = R \cdot I_o$ ha sempre la stessa polarità, ovvero è raddrizzata. Nei diodi, invece la corrente scorre soltanto durante una delle due semionde: la coppia D_1, D_3 conduce durante le semionde negative mentre la coppia D_2, D_4 conduce durante le semionde positive.

Le forme d'onda relative al funzionamento del circuito a ponte di Graetz sono mostrate nella figura 19. I parametri caratteristici delle forme d'onda riportate in figura sono identici a quelli indicati nel caso precedente del raddrizzatore con trasformatore a prese centrale, più precisamente:

tensione d'uscita V_o :

- valore massimo $V_{o,MAX} = V_P$
- valore medio $V_{o,m} = \frac{2 \cdot V_P}{\pi}$

corrente nel carico I_o :

- valore massimo $I_{MAX} = \frac{V_P}{R}$
- valore medio $I_m = \frac{V_{o,m}}{R} = \frac{2 \cdot V_P}{\pi R}$

Infine, considerando che ciascun diodo conduce solo durante un semiperiodo, le correnti nei diodo sono:

- corrente diretta di picco $I_{D,MAX} = I_{MAX} = \frac{V_P}{R}$
- corrente diretta media $I_{D,m} = \frac{I_{MAX}}{\pi} = \frac{V_P}{\pi R}$

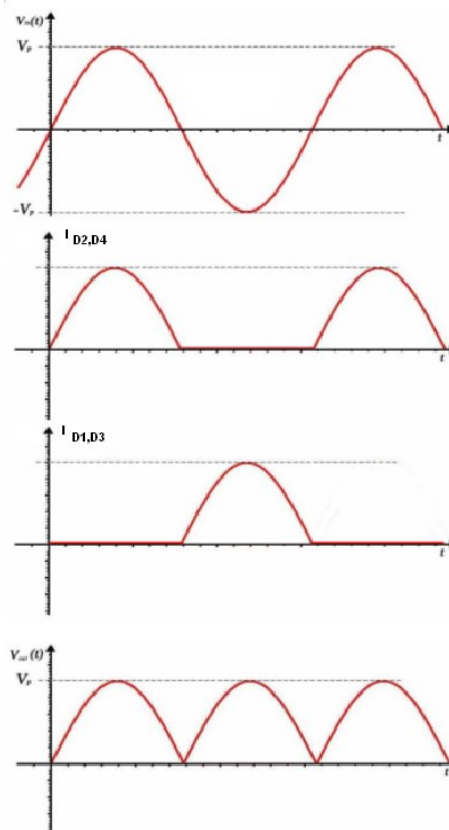


figura 19 - forme d'onda per il raddrizzatore a doppia semionda a ponte di Graetz

Rispetto al caso del trasformatore a presa centrale risulta invece dimezzata la tensione inversa di picco su ciascun diodo: $V_{RRM} = V_P$

Questo è proprio uno dei motivi che rendono preferibile il raddrizzatore a ponte di Graetz rispetto a quello con trasformatore a presa centrale. A parità di tensione d'uscita V_o , infatti, nel trasformatore a ponte:

- i diodi devono sopportare tensioni inverse dimezzate
- il numero di spire richiesto per l'avvolgimento secondario è la metà

Circuito raddrizzatore con filtro capacitivo

Il segnale prodotto da un circuito raddrizzatore è ancora un segnale oscillante. Per ridurre notevolmente l'ampiezza di tale oscillazione e avvicinare il segnale prodotto alla condizione di segnale continuo, si può collegare sull'uscita del raddrizzatore, in parallelo al carico, un condensatore facente la funzione di filtro (figura 20). Il funzionamento del sistema si basa sul fatto che il condensatore accumula energia durante la fase di conduzione dei diodi e poi la restituisce lentamente al carico, prolungando così il tempo in cui scorre corrente nel carico stesso e riducendo notevolmente l'ampiezza dell'oscillazione residua.

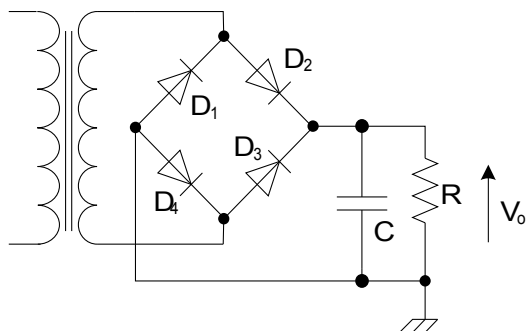


figura 20 - schema elettrico raddrizzatore a ponte con filtro capacitivo

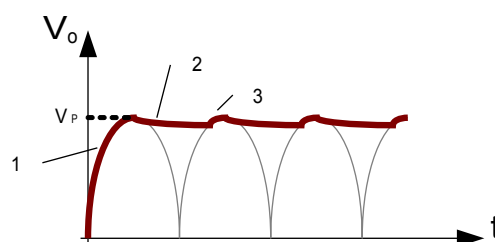


figura 21 - forma d'onda del segnale d'uscita prodotto dal raddrizzatore a doppia semionda con filtro capacitivo

In figura 21 è riportata la forma d'onda del segnale prodotto da un raddrizzatore a ponte con filtro capacitivo, ottenuta supponendo il condensatore C inizialmente scarico. Per meglio comprendere tale forma d'onda si considerino i tratti numerati:

1. durante la prima semionda i diodi D_2 e D_4 entrano in conduzione e permettono al condensatore di caricarsi. Nell'ipotesi di diodi ideali la costante di tempo di carica è nulla e la tensione ai capi del condensatore segue esattamente l'andamento del segnale d'ingresso, fino a che V_o non raggiunge il valore di picco V_P
2. una volta raggiunto il valore di picco, la tensione d'ingresso assume un valore inferiore rispetto alla tensione d'uscita e i diodi D_2 e D_4 si polarizzano inversamente, determinando di fatto l'apertura del circuito d'ingresso rispetto all'uscita. Il condensatore comincia allora a scaricarsi attraverso l'unico percorso possibile, la resistenza di carico R , con costante di tempo $\tau = R \cdot C$. La scarica prosegue fino a quando la semionda negativa, ribaltata grazie all'effetto del ponte, non assume un valore pari alla tensione presente sul condensatore nel medesimo istante.
3. a questo punto la tensione d'ingresso è nuovamente superiore alla tensione d'uscita, i diodi D_1 e D_3 si polarizzano direttamente e consentono al condensatore di riprendere a caricarsi. La carica va avanti fino a che non viene raggiunto nuovamente il valore di picco, dopodiché i punti 2 e 3 si ripetono ciclicamente, con l'alternarsi, durante le fasi di carica, della conduzione delle coppie di diodi D_2, D_4 e D_1, D_3 .

Il punto chiave del funzionamento del filtro è che la costante di tempo di scarica τ deve essere molto grande rispetto al periodo del segnale sinusoidale d'ingresso. Se la condizione $\tau \gg T/2$ è verificata, infatti, la scarica risulta essere molto lenta rispetto alle pulsazioni del segnale raddrizzato dal ponte e la tensione ai capi del condensatore si riduce molto poco prima che intervenga una nuova carica; in definitiva le oscillazioni residue della tensione d'uscita risultano molto contenute.

Supponendo dunque $\tau \rightarrow \infty$, approssimando l'esponenziale di carica con un andamento rettilineo e infine assumendo nullo il tempo di carica del condensatore, la forma d'onda del segnale d'uscita V_o può essere considerata triangolare, come mostrato nella figura 22:

Durante l'intervallo di tempo $T/2$ durante il quale il condensatore si scarica, la corrente nel condensatore, che

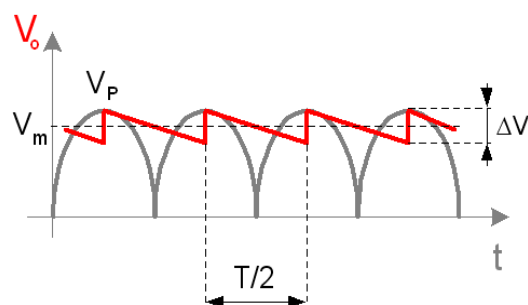


figura 22 - approssimazione della tensione d'uscita nel raddrizzatore a doppia semionda con filtro capacitivo

può essere calcolate mediante la formula $I_C = C \cdot \frac{\Delta V_o}{\Delta t}$, risulta essere costante e coincidente con la corrente che scorre nel carico $I_C = I_o$. La variazione di tensione ai capi del carico ΔV_o può quindi essere calcolata nel modo seguente:

$$\Delta V_o = \frac{I_C \cdot \Delta t}{C} = \frac{I_o \cdot T/2}{C} = \frac{I_o}{2fC}$$

equazione 3

Si osservi ulteriormente come la tensione V_o possa essere scomposta nelle sue due componenti principali:

- componente continua di valore pari al valore medio $V_m = R \cdot I_o$
- componente oscillante (segnale triangolare) di ampiezza ΔV_o e valore medio nullo

Si definisce allora **fattore di ripple** il rapporto tra il valore efficace del segnale d'uscita e il suo valore medio:

$$r = \frac{V_{eff}}{V_m}$$

Poiché il valore efficace di un segnale triangolare è definito come $V_{eff} = \frac{\Delta V}{2\sqrt{3}}$, sostituendo l'equazione 3

in tale definizione si ottiene: $V_{eff} = \frac{\Delta V_o}{2\sqrt{3}} = \frac{I_o}{4\sqrt{3}fC}$

e in definitiva: $r = \frac{V_{eff}}{V_m} = \frac{\frac{I_o}{4\sqrt{3}fC}}{R \cdot I_o} = \frac{1}{4\sqrt{3}fRC}$

equazione 4

Analizziamo ora l'andamento della corrente nei diodi del ponte. Come mostrato nella figura 23, tale corrente ha un andamento impulsivo, in quanto i diodi conducono solo durante i brevi intervalli durante i quali il condensatore si ricarica. Proprio a causa di tale andamento non è possibile ridurre il *ripple* oltre un certo margine perché al diminuire del *ripple* si riduce anche l'intervallo di conduzione e questo, a parità di altre condizioni, fa aumentare l'ampiezza dei picchi in quanto la stessa quantità di carica deve essere accumulata sul condensatore in un tempo più breve. In particolare, la quantità di carica che si accumula sulla capacità durante l'intervallo di conduzione dei diodi può essere ottenuta dal prodotto della corrente media nei diodi per il periodo degli impulsi:

$$\Delta Q_{acc} = I_{D,m} \cdot T$$

Viceversa, la quantità di carica ceduta al carico durante la fase di scarica, trascurando Δt e approssimando la durata della carica stessa a $T/2$, si può scrivere:

$$\Delta Q_{ced} = I_o \cdot \frac{T}{2}$$

A regime le due variazioni di carica risultano uguali: $\Delta Q_{acc} = \Delta Q_{ced}$, da cui si deduce immediatamente che la corrente media in ciascun diodo vale:

$$I_{D,m} = \frac{I_o}{2}$$

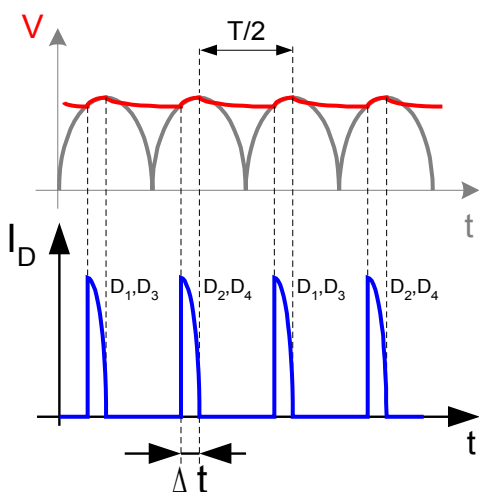


figura 23 - andamento impulsivo della corrente nei diodi nel raddrizzatore a doppia semionda

Per il dimensionamento dei diodi si deve però tenere conto anche della corrente di picco, che assume valori notevolmente più alti della corrente media. In particolare, si può dimostrare che il valore di picco è dato da:

$$I_{D,max} = 2\pi I_{D,m} \sqrt{fRC}$$

A conferma di quanto già in parte detto, si confrontino quest'ultima espressione con la formula del ripple (equazione 4). Da tale confronto emerge che per ridurre il *ripple* si deve scegliere una capacità elevata ma questo comporta contemporaneamente uno sfavorevole aumento della corrente di picco nei diodi. Nella scelta della capacità si dovrà quindi operare una scelta di compromesso tra l'esigenza di ridurre il *ripple* mantenendo nel contempo una condizione di lavoro accettabile per i diodi.

In definitiva la scelta dei diodi deve essere fatta in modo che i parametri caratteristici rispettino le seguenti condizioni:

$$I_{F,AV} > I_{D,m} \qquad I_{FRM} > I_{D,max}$$

e per quanto riguarda la tensione inversa:

$$V_{RRM} > V_{R,MAX} = V_P$$

Diodi speciali

Diodi zener

I diodi zener sono diodi costruiti per lavorare nella regione di *breakdown*: essi sono infatti caratterizzati da una tensione di *breakdown* particolarmente stabile e definita, detta **tensione di zener** V_Z . Nelle figure 24 e 25 sono mostrati rispettivamente il simbolo e la curva caratteristica di un diodo zener:

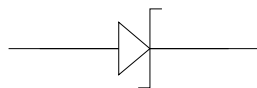


figura 24 - simbolo del diodo zener

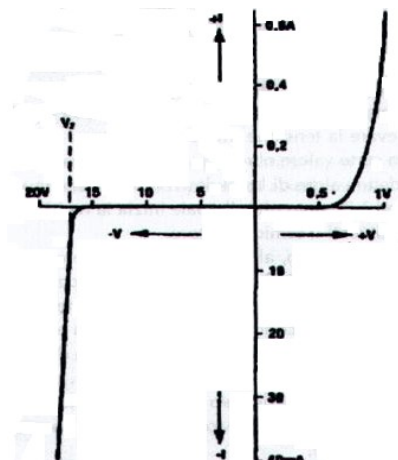


figura 25 - curva caratteristica di un diodo zener

Osservando la figura 25 si può notare che:

- la caratteristica diretta di un diodo zener è simile a quella di un diodo generico: in polarizzazione diretta il diodo zener funziona dunque come qualunque altro diodo.
- la caratteristica inversa mostra, alla tensione di zener V_Z , un ginocchio oltre il quale la corrente inversa aumenta in modo quasi verticale ovvero, detto in altri termini, la resistenza differenziale inversa $r_{d,z}$ del diodo zener è praticamente nulla. In questa regione a una variazione anche sostanziale della corrente che scorre nel diodo corrisponde una variazione molto contenuta della tensione ai suoi capi; questa caratteristica dei diodi zener viene sfruttata per realizzare dei circuiti stabilizzatori di tensione.

Regolando opportunamente il drogaggio si possono ottenere diodi zener con diversi valori caratteristici della tensione di zener, che possono andare da qualche volt, fino a circa 200V. In particolare, i valori di V_Z più bassi si ottengono con forti drogaggi: in questo modo, infatti, il campo elettrico interno alla giunzione è molto forte ed

è sufficiente una tensione inversa anche ridotta per innescare il breakdown. I valori nominali di V_Z sono normalizzati in modo analogo a quanto avviene per i resistori. In appendice sono riportati i valori comunemente in commercio e l'interpretazione delle sigle di alcune delle serie commerciali più comuni.

Tra i parametri caratteristici del diodo zener riveste una certa importanza il **coefficiente di temperatura TC**, definito come la variazione relativa della tensione di zener, riferita ad una variazione di temperatura di 1°C :

$$TC = \frac{\Delta V_Z}{V_Z \cdot \Delta T}$$

Il coefficiente di temperatura presenta la caratteristica di essere negativo per i diodi con tensione di zener nominale minore di 5V, per i quali predomina il breakdown di tipo zener, e positivo per i diodi con tensione di zener nominale superiore a 6V, per i quali predomina invece il breakdown per effetto valanga. Per i diodi con tensione di zener compresa tra 5 e 6V, infine, il coefficiente di temperatura è prossimo allo zero. Per questo motivo, quando è possibile, si tende a preferire l'utilizzo di diodi zener con tensioni nominali in questa fascia; uno dei valori più utilizzati è infatti $V_Z=5,6\text{V}$.

Circuito stabilizzatore a diodo zener

Lo schema di un circuito stabilizzatore a diodo zener è rappresentato nella figura 26. Il diodo è in grado di rendere stabile la tensione applicata al carico R, V_o , sia rispetto alle eventuali variazioni della tensione d'ingresso sia rispetto alle variazioni del carico stesso.

Questo particolare tipo di stabilizzatore viene detto parallelo in quanto l'elemento di controllo, ovvero il diodo zener D_Z è collegato in parallelo al carico R. Il funzionamento si basa sul fatto che lo zener costituisce un percorso alternativo per la corrente e mantiene costante la tensione d'uscita V_o assorbendo eventuali variazioni della corrente.

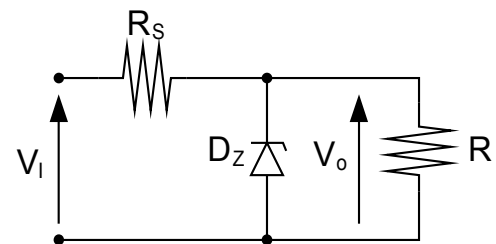


figura 26 - circuito stabilizzatore a diodo zener

Per quanto riguarda il dimensionamento del circuito stabilizzatore si considerino i seguenti criteri di progetto:

- la tensione d'ingresso V_I deve essere ovviamente più grande della tensione che si vuole ottenere in uscita, V_o . Un buon criterio è scegliere $V_I \approx 2 V_o$.
- per quanto riguarda il diodo zener ci sono diversi parametri da valutare:
 - la tensione di zener coincide con la tensione d'uscita $V_Z = V_o$
 - la corrente massima deve coincidere con la massima corrente prevista dal carico (funzionamento a vuoto): $I_{Z,MAX} = I_{o,MAX}$
 - la corrente minima nel diodo zener deve essere tale da garantire che il punto di lavoro del diodo stesso si trovi oltre il ginocchio di inizio del breakdown. Generalmente si può porre $I_{Z,min} = (5 \div 10)\% I_{Z,max}$
 - infine il diodo deve sopportare una potenza massima $P_{Z,MAX} = V_Z \cdot I_{Z,MAX}$
- infine, per il dimensionamento della resistenza di limitazione R_S si consideri:
 - anche nelle peggiori condizioni, ovvero quando $V_I = V_{I,min}$ e $I_o = I_{o,MAX}$, nello zener deve comunque circolare una corrente $I_Z \geq I_{Z,min}$. Da ciò si ricava:
$$R_S \geq \frac{V_{I,min} - V_Z}{I_{Z,min} + I_{o,MAX}}$$
 - dal punto di vista della dissipazione di potenza, la situazione peggiore per R_S si verifica quando $V_I = V_{I,MAX}$. R_S deve quindi sopportare una potenza
$$P_S \geq \frac{(V_{I,MAX} - V_Z)^2}{R_S}$$
 - una volta dimensionato il resistore R_S , occorre verificare che anche a vuoto, ovvero in assenza del carico R, la corrente nel diodo zener sia inferiore al valore massimo consentito:

$$I_Z = \frac{V_{I,MAX} - V_Z}{R_S} \leq I_{Z,MAX}$$

Il circuito stabilizzatore a diodo zener presenta diversi svantaggi:

- poiché il resistore R_s dissipa potenza, diminuisce il rendimento del circuito, ovvero si riduce la potenza utile trasferita al carico;
- I valori di corrente massima che possono scorrere nel carico, essendo $I_{o,MAX}=I_{z,MAX}$, sono limitati dal diodo zener e sono solitamente dell'ordine di 100mA, un valore basso rispetto a quanto viene solitamente richiesto ad un circuito alimentatore;
- poiché il diodo zener è soggetto a grosse variazioni di corrente, la stabilizzazione in realtà non è particolarmente buona in quanto la variazione di tensione di zener, data dall'espressione $\Delta V_z = r_{i,z} \cdot \Delta I_z = r_{i,z} \cdot (I_{z,MAX} - I_{z,min})$ è un valore non nullo, essendo la resistenza differenziale reale del diodo zener $r_{d,z}$ piccola ma diversa da zero;

Per tutti questi motivi, il circuito stabilizzatore a diodo zener viene utilizzato in realtà solo in casi limitati, mentre in generale si preferisce utilizzare il diodo zener con la sola funzione di fornire una tensione di riferimento costante, demandando ad altri dispositivi, generalmente dei transistor, la funzione di stabilizzazione vera e propria.

Diodi schottky

I diodi schottky, il cui simbolo è riportato in figura 27, sono costituiti da una giunzione metallo-semiconduttore rettificante e presentano una tensione di soglia inferiore a quella dei diodi al silicio e pari a circa 0,35V. La caratteristica peculiare di questi diodi è il basso tempo di recupero inverso che li rende adatti ad essere utilizzati in tutte le applicazioni in cui la velocità è un requisito importante.

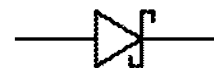


figura 27 - simbolo del diodo schottky

Diodi varicap

La giunzione polarizzata inversamente presenta un effetto capacitivo perché nella regione di svuotamento sono presenti delle cariche opposte affacciate. La dipendenza di tale effetto dalla tensione di polarizzazione inversa permette di utilizzare il diodo come capacità variabile. I valori di capacità associati a questi diodi possono variare tra pochi pF e poche centinaia di pF; essi vengono quindi utilizzati come capacità variabili in circuiti ad alta frequenza. Il simbolo del diodo varicap è riportato in figura 28.

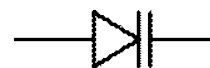


figura 28 - simbolo del diodo varicap

Diodi LED

Nei diodi polarizzati direttamente, in prossimità della giunzione vi è un forte effetto di ricombinazione di coppie elettrone/lacuna. Tale ricombinazione avviene con emissione di energia. Nei diodi generici l'energia emessa è di tipo termico. Nei diodi LED (Light Emitting Diode), invece, l'energia emessa è di tipo luminoso. Il colore della radiazione luminosa emessa da un diodo LED dipende dal composto con cui è realizzata la corrispondente giunzione, mentre l'intensità della luce aumenta con la corrente diretta e diminuisce al crescere della temperatura.

Colore	Tensione diretta
Infrarosso	1,3 V
Rosso	1,8 V
Giallo	1,9 V
Arancio	2,0 V
Verde	2,0 V
Azzurro	3 V
Blu	3,5 V
Ultravioletto	4 -:- 4,5 V

I valori della tensione di soglia tipici dei diodi LED, suddivisi secondo il colore della radiazione luminosa emessa, sono mostrati nella tabella a fianco. Le correnti di conduzione diretta utilizzate sono invece mediamente comprese nell'intervallo $I_F=(5\div 20)$ mA.

Occorre inoltre porre particolare attenzione alla polarizzazione inversa, che nel caso dei diodi LED deve essere sempre molto limitata. La tensione di polarizzazione inversa massima, infatti, vale:

$$V_{R,MAX}=(3\div 5)V$$

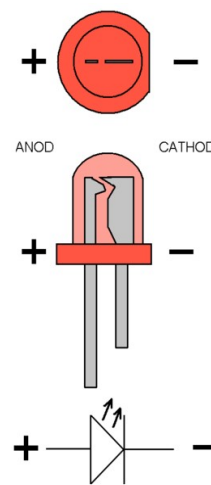


figura 29 - simbolo e struttura di un diodo LED

I diodi LED sono largamente impiegati come elementi di visualizzazione, anche in display e matrici, perché sono caratterizzati da:

- lunga durata
- basso consumo di energia
- buona velocità di commutazione
- ridotte dimensioni

Fotodiodi

I fotodiodi sono diodi sensibili alle radiazioni luminose che vengono utilizzati in polarizzazione inversa. In questo caso, quando vengono colpiti dalla luce all'interno della regione di svuotamento della giunzione si crea un numero elevato di portatori liberi che danno luogo a una corrente rilevabile. Tale corrente inversa dipende dall'intensità della radiazione luminosa che colpisce il fotodiodo e dalla sua lunghezza d'onda. Il simbolo del fotodiodo è mostrato in figura 30.



figura 30 - simbolo del fotodiodo

I fotodiodi vengono impiegati nei controlli ottici di posizione e come terminali di fibre ottiche.

Appendice

Datasheet del diodo 1N4148

Philips Semiconductors

Product specification

High-speed diodes

1N4148; 1N4448

FEATURES

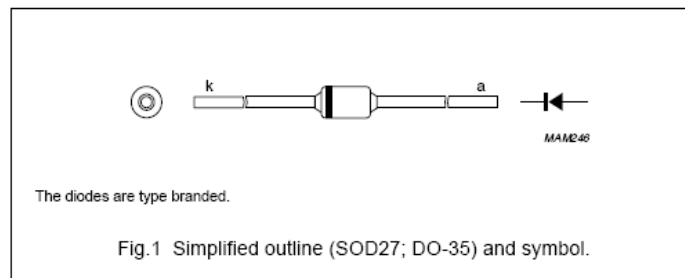
- Hermetically sealed leaded glass SOD27 (DO-35) package
- High switching speed: max. 4 ns
- General application
- Continuous reverse voltage: max. 75 V
- Repetitive peak reverse voltage: max. 100 V
- Repetitive peak forward current: max. 450 mA.

APPLICATIONS

- High-speed switching.

DESCRIPTION

The 1N4148 and 1N4448 are high-speed switching diodes fabricated in planar technology, and encapsulated in hermetically sealed leaded glass SOD27 (DO-35) packages.



LIMITING VALUES

In accordance with the Absolute Maximum Rating System (IEC 60134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_{RRM}	repetitive peak reverse voltage		–	100	V
V_R	continuous reverse voltage		–	75	V
I_F	continuous forward current	see Fig.2; note 1	–	200	mA
I_{FRM}	repetitive peak forward current		–	450	mA
I_{FSM}	non-repetitive peak forward current	square wave; $T_j = 25\text{ °C}$ prior to surge; see Fig.4 $t = 1\ \mu\text{s}$ $t = 1\ \text{ms}$ $t = 1\ \text{s}$	–	4 1 0.5	A A A
P_{tot}	total power dissipation	$T_{amb} = 25\text{ °C}$; note 1	–	500	mW
T_{stg}	storage temperature		–65	+200	°C
T_j	junction temperature		–	200	°C

Note

1. Device mounted on an FR4 printed circuit-board; lead length 10 mm.

Philips Semiconductors

Product specification

High-speed diodes

1N4148; 1N4448

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

$T_j = 25\text{ °C}$ unless otherwise specified.

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.	UNIT
V_F	forward voltage	see Fig.3			
	1N4148	$I_F = 10\text{ mA}$	–	1	V
	1N4448	$I_F = 5\text{ mA}$ $I_F = 100\text{ mA}$	0.62 –	0.72 1	V V
I_R	reverse current	$V_R = 20\text{ V}$; see Fig.5		25	nA
		$V_R = 20\text{ V}$; $T_j = 150\text{ °C}$; see Fig.5	–	50	μA
I_R	reverse current; 1N4448	$V_R = 20\text{ V}$; $T_j = 100\text{ °C}$; see Fig.5	–	3	μA
C_d	diode capacitance	$f = 1\text{ MHz}$; $V_R = 0$; see Fig.6	–	4	pF
t_{rr}	reverse recovery time	when switched from $I_F = 10\text{ mA}$ to $I_R = 60\text{ mA}$; $R_L = 100\ \Omega$; measured at $I_R = 1\text{ mA}$; see Fig.7	–	4	ns
V_{fr}	forward recovery voltage	when switched from $I_F = 50\text{ mA}$; $t_r = 20\text{ ns}$; see Fig.8	–	2.5	V

THERMAL CHARACTERISTICS

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	VALUE	UNIT
$R_{th\ j-tp}$	thermal resistance from junction to tie-point	lead length 10 mm	240	K/W
$R_{th\ j-a}$	thermal resistance from junction to ambient	lead length 10 mm; note 1	350	K/W

Note

1. Device mounted on a printed circuit-board without metallization pad.

Valori e sigle commerciali dei diodi zener

La tabella riporta i valori standard di tensione di zener normalmente reperibili in commercio:

2,0V	6,2V	20V	62V
2,2V	6,8V	22V	68V
2,4V	7,5V	24V	75V
2,7V	8,2V	27V	82V
3,0V	9,1V	30V	91V
3,3V	10V	33V	100V
3,6V	11V	36V	110V
3,9V	12V	39V	120V
4,3V	13V	43V	130V
4,7V	15V	47V	150V
5,1V	16V	51V	160V
5,6V	18V	56V	180V
			200V

Per ciascun valore di tensione riportato nella tabella, si trovano diodi zener di diverse potenze. Le più diffuse sono da 0,5Watt e 1,3Watt.

Le sigle dei diodi zener

La serie BZX

Alla sigla iniziale BZX seguono tre caratteri che indicano la potenza e infine due o tre caratteri per la tensione.

I caratteri che identificano la potenza sono:

- **55C** oppure **79C** per zener da 0,5W
- **85C** per zener da 1,3W

La tensione è indicata con il valore stesso, contenente la lettera "V" al posto della virgola. Ad esempio:

- **6V8** per zener da 6,8V
- **4V7** per zener da 4,7V
- **15** per zener da 15V

Quindi, ad esempio:

- **BZX79C4V7** è uno zener da 4,7V 0,5W
- **BZX85C5V1** è uno zener da 6,8V 1,3W

La serie Z

La sigla iniziale, che inizia con la lettera Z, indica la potenza e precede il valore di tensione.

Le lettere che indicano la potenza sono:

- **ZPD** per zener da 0,5W
- **ZPY** per zener da 1,3W
- **ZY** per zener da 2W

Quindi, ad esempio:

- **ZPD3,9V** è uno zener da 3,9V 0,5W
- **ZPY3,9V** è uno zener da 3,9V 1,3W
- **ZY5,6V** è uno zener da 5,6V 2W