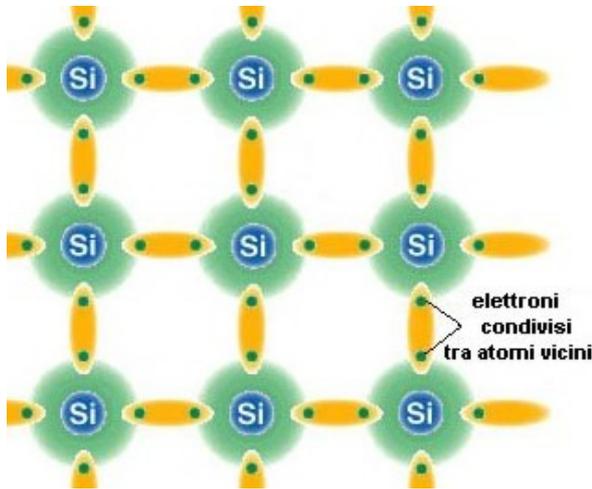


Semiconduttori

Il materiale largamente più usato per fabbricare dispositivi allo stato solido è il silicio, sono usati anche GaAs (arseniuro di gallio) e Ge (germanio).

Il silicio puro (intrinseco) prende la forma cristallografica in cui un atomo di Si (al centro di un tetraedro) è circondato da 4 atomi di Si, con i quali è legato da un legame covalente, formato da 2 elettroni di valenza che ruotano attorno ai 2 nuclei di Si che legano.

Allo zero assoluto, gli elettroni occupano lo stato energetico più basso: formano i legami covalenti e non sono liberi di muoversi ; a 0°K, il silicio è un isolante.



A 300 K, una piccola parte di elettroni può guadagnare sufficiente energia termica per rompere i legami covalenti, generando elettroni e lacune liberi di muoversi all'interno del cristallo. Dato che il numero di elettroni liberi a 300 K è molto inferiore a quello di un buon conduttore questi materiali sono detti semiconduttori. Un legame covalente rotto lascia un buco di un elettrone (lacuna), che si può vedere come una carica positiva libera di muoversi nel cristallo.

Se si applica un campo, elettroni e lacune, muovendosi, contribuiscono alla corrente.

Elettroni e lacune sono generati dall'energia termica, che causa la rottura del legame covalente: maggiore la temperatura, maggiore il tasso di generazione. D'altro canto, quando un elettrone libero incontra

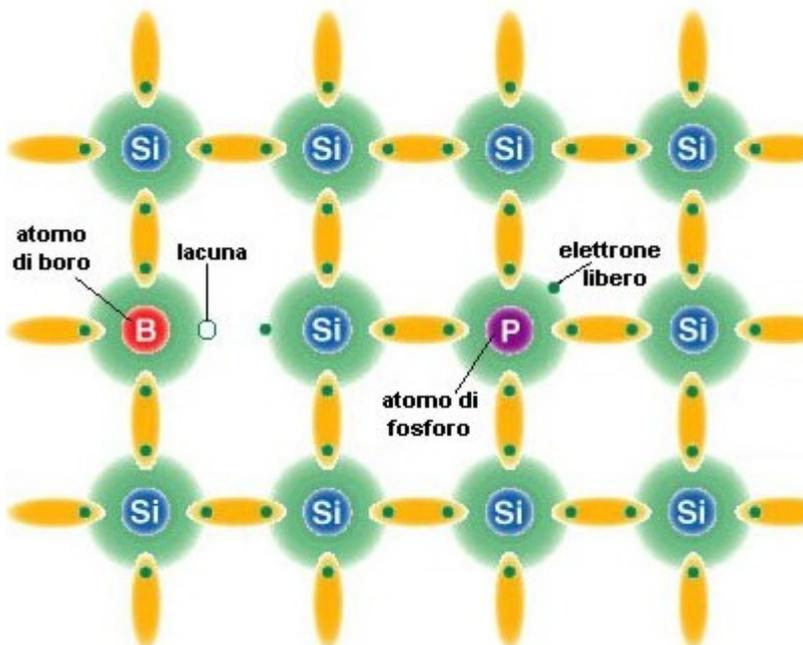
una lacuna, si può ricombinare per formare un legame covalente (il tasso di ricombinazione è proporzionale alla concentrazione di elettroni e lacune).

Ad una data temperatura, esiste quindi un equilibrio dinamico dove il tasso di generazione e di ricombinazione sono uguali.

La concentrazione di portatori (elettroni e lacune) è proporzionale alla temperatura.

La conduttività (= capacità di condurre corrente) è proporzionale alla concentrazione di portatori, quindi cresce con la temperatura in un semiconduttore.

La conduttività può essere modificata con il drogaggio.



Per drogare il silicio, non si ricorre a degli spacciatori, ma si inseriscono nel reticolo del cristallo atomi appartenenti al terzo o al quinto gruppo del sistema periodico degli elementi, in modo da ottenere due strutture differenti, una con un numero di elettroni insufficiente, l'altra con un numero di elettroni eccessivo.

Spesso si utilizzano il **boro** (terzo gruppo) ed il **fosforo** (quinto gruppo).

Un atomo di **boro dispone di soli tre elettroni di valenza**, quindi nel punto dove viene inserito si forma una lacuna (manca un elettrone di legame). Un atomo di **fosforo invece dispone di cinque elettroni di valenza**, quindi nel punto dove viene inserito ci sarà un elettrone libero che non riesce a legarsi a nessun atomo di silicio. Il silicio drogato con boro (con eccesso di lacune)

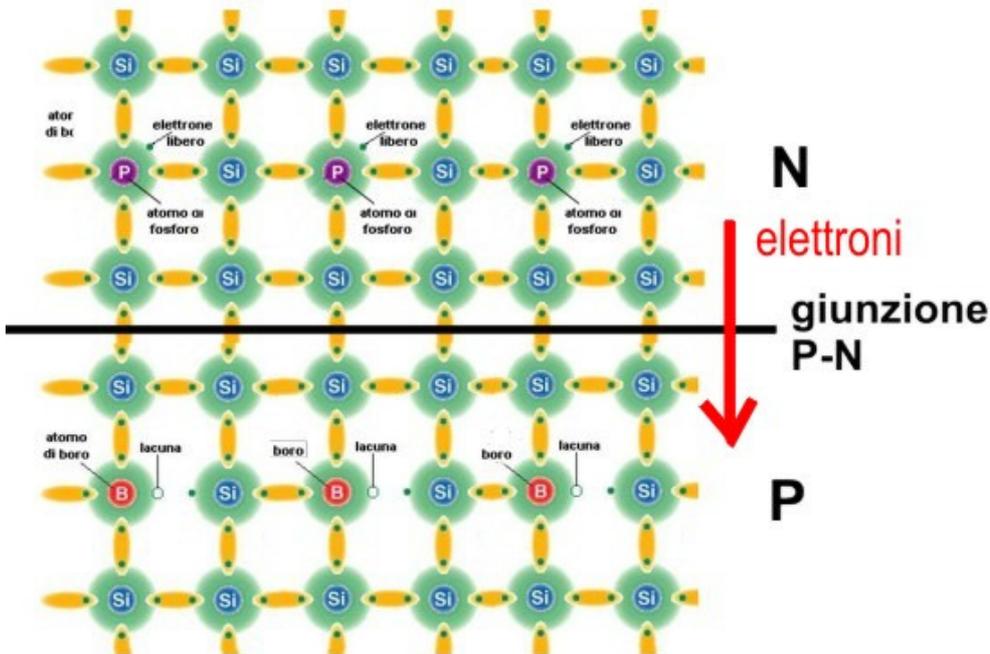
viene chiamato di **tipo p**, mentre quello drogato con fosforo (con eccesso di elettroni) viene chiamato **tipo n**.

Se si costruiscono due placche di silicio molto sottili, una drogata con fosforo (tipo n) e una drogata con boro (tipo p) e si mettono a contatto, succederà che gli elettroni liberi, abbondanti nel silicio di tipo n, migreranno verso il silicio di tipo p, cercando di riempire le lacune lasciate dal boro.

Il silicio di tipo n e di tipo p sono neutri dal punto di vista della carica elettrica in quanto il numero di elettroni presenti è compensato dal numero di protoni dei nuclei atomici, quando però gli elettroni si spostano le cariche elettriche non sono più bilanciate e il silicio di tipo p risulta carico negativamente (a causa degli elettroni che sono arrivati), mentre quello di tipo n risulta carico positivamente (a causa degli elettroni che se ne sono andati).

Nei semiconduttori di tipo n, la conduzione è dovuta prevalentemente agli elettroni liberi, che sono chiamati portatori maggioritari (le lacune sono dette portatori minoritari).

La conduzione nei semiconduttori di tipo p è dovuta alle lacune portatori maggioritari, mentre gli elettroni sono portatori minoritari.



Due zone drogate n e p vicine formano una giunzione e quindi un diodo

Tralasciamo la fisica dei semiconduttori e vediamo ora come funziona un diodo

DIODI E CIRCUITI CON DIODI

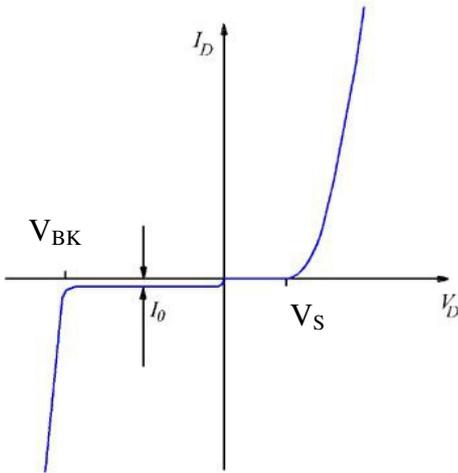
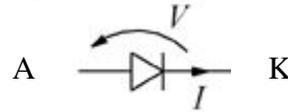
Il diodo è uno dei componenti elettronici più importanti (con i transistor MOSFET e BJT) per le sue numerose applicazioni circuitali.

Il diodo ha due terminali: l'anodo e il catodo.

La tensione V_D è considerata positiva quando $V_A > V_K$ (V_A tensione sull'anodo e V_K tensione sul catodo) quindi $V_D = V_A - V_K$

La corrente I_D è positiva quando scorre dall'anodo al catodo.

Se $V_D > 0$, $I_D > 0$ e siamo in polarizzazione diretta.



In polarizzazione diretta, la corrente I_D scorre nel verso indicato dalla freccia che costituisce il simbolo del diodo: $I_D > 0$

Se $V_D < V_S$ e $> V_{BK}$, $I_D = 0$ (la I_0 corrente indicata sulla caratteristica è molto piccola e la consideriamo nulla) e siamo in condizioni di polarizzazione inversa

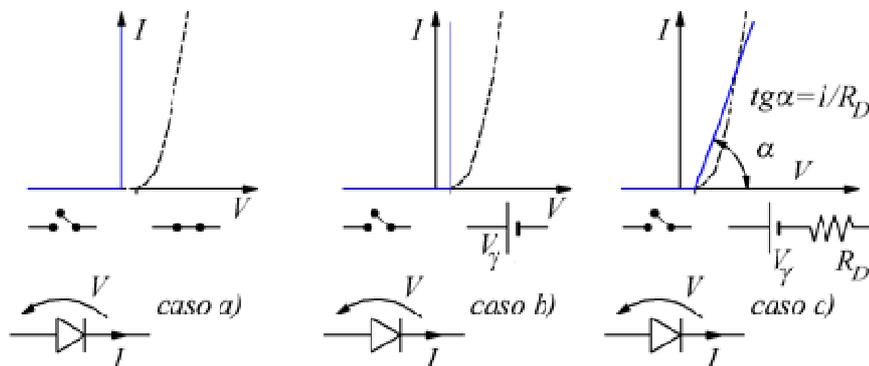
Se $V_D < V_{BK}$ (in modulo è abbastanza elevata) il diodo opera in regione inversa di breakdown (rottura): se la temperatura a cui opera il dispositivo non è troppo elevata, questa condizione può non essere distruttiva per il dispositivo; i Diodi Zener sono dispositivi che operano infatti in questa zona della caratteristica.

Modelli approssimati del diodo

L'uso della caratteristica del diodo per la soluzione di circuiti è decisamente poco pratico, anche perché non sono sempre disponibili le caratteristiche dei diodi reali. Comunemente si ricorre, quindi, a modelli circuitali del diodo introducendo approssimazioni più o meno drastiche a seconda del tipo di applicazione.

In questo modo anche la curva caratteristica si riduce a una spezzata che interpola la caratteristica reale.

Un'approssimazione valida nella quasi totalità dei casi è quella che considera il diodo polarizzato inversamente come una resistenza $R_D = \infty$ di valore infinito ossia un circuito aperto.



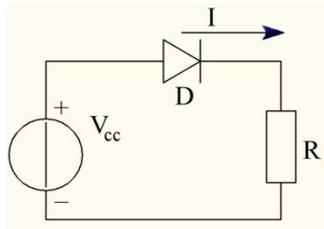
CASO A: DIODO COME INTERRUTTORE. Dovendo valutare qualitativamente il funzionamento di un circuito comprende uno o più diodi, spesso si utilizza il modello più semplice, che considera il diodo in polarizzazione inversa come un interruttore aperto e il diodo in polarizzazione diretta come un interruttore chiuso ovvero un cortocircuito.

CASO B: DIODO COME BATTERIA. Mentre è lecito considerare il diodo in polarizzazione inversa come un circuito aperto, in molti casi è necessario tener conto della caduta di tensione non nulla sul diodo in polarizzazione diretta. Il diodo in polarizzazione diretta viene quindi rappresentato come in figura b) cioè

come una batteria di valore $V_\gamma = 0,7V$ per i diodi al silicio, $0,3$ per diodi al germanio.

CASO C: DIODO COME BATTERIA E RESISTENZA. E' un modello più preciso che consente di considerare anche la variazione di tensione ai capi del diodo al variare della corrente circolante dove $V_\gamma = 0,7V$ e alla resistenza R_D viene assegnato un valore da pochi Ω a poche decine di Ω .

La caratteristica del diodo è non lineare: di conseguenza, le tecniche di analisi di circuiti lineari (studiate nel corso di elettrotecnica) non possono essere utilizzate. In elettronica sono stati sviluppati metodi di analisi di circuiti contenenti elementi non lineari (diodi e transistor): uno di questi è l'analisi con retta di carico (metodo grafico)

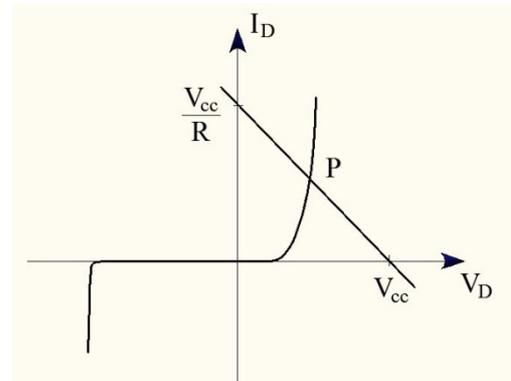


Consideriamo il circuito in figura: noto V_{cc} e R , l'equazione di Kirchoff presenta 2 incognite: I_D e V_D

$$V_{cc} = V_D + RI_D \quad (I=I_D)$$

Serve un'altra equazione che leghi I_D e V_D : questa è data dalla caratteristica I_D-V_D del diodo, disponibile in forma grafica (essendo non lineare)

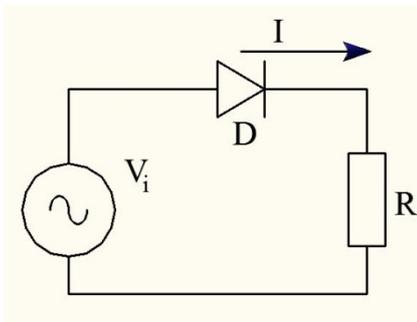
L'intersezione fra la caratteristica del diodo e la retta di carico individua il punto di funzionamento o di lavoro statico (P), ovvero fornisce i valori di I e V per quel particolare diodo, in quel circuito, con quel valore di R e con una data tensione V_{cc} .



Se V_{cc} varia, la retta di carico si sposta, mantenendo la stessa pendenza dal momento che R non è variata, e così si sposta il punto di lavoro (P). Pertanto, al variare di V_{cc} , il punto di lavoro si muove sulla caratteristica del diodo consentendo di individuare i corrispondenti valori di corrente.

Per un diodo al silicio la tensione varia tra $0,6$ volt della tensione di soglia (I piccola, punto P vicino alla soglia) a $0,8$ volt (I massima, punto P in alto) massimi su un diodo al silicio.

Quindi in generale piuttosto che fare complicati conti se il diodo conduce spesso si approssima la caduta di tensione del diodo con un valore intermedio.. $0,7$ volt.

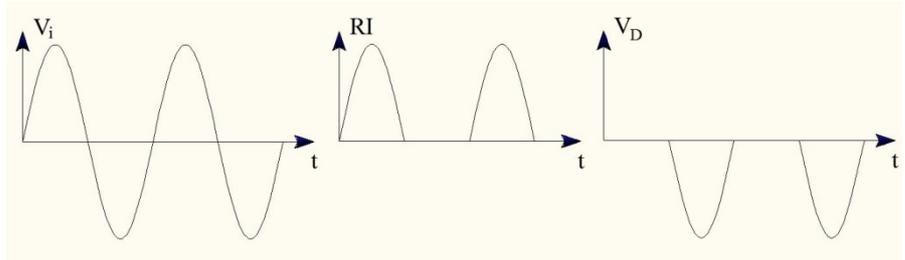


I circuiti rettificatori convertono potenza AC in DC e sono alla base dei generatori di potenza, dei circuiti che caricano batterie e dei convertitori di tensione AC in DC.

Circuito rettificatore a singola semionda con sorgente di segnale sinusoidale e carico resistivo:

$$v_i = v_D + Ri$$

se il diodo è ideale, e $v_i > 0$ la tensione sul diodo è nulla (interruttore chiuso)



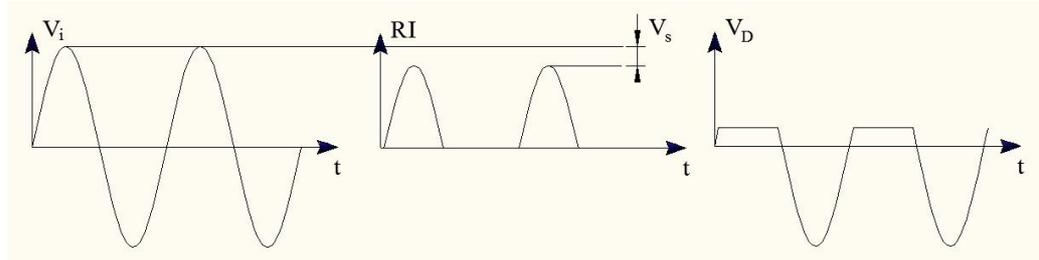
$$\begin{cases} v_i = v_D + Ri \\ v_D = 0 \end{cases} \quad \text{quindi } v_i = Ri$$

se il diodo è ideale, e $v_i < 0$ la corrente sul diodo è nulla (interruttore aperto)

$$\begin{cases} v_i = v_D + Ri \\ i = 0 \end{cases} \quad \text{quindi } v_i = v_D$$

Su R la corrente e la tensione sono raddrizzate, non sono costanti ma sono continue perchè non si invertono, non cambiano segno.

$v_i = v_D + Ri$
se il diodo è reale,
e $v_i > V_S$ la
tensione sul diodo
è V_S



$$\begin{cases} v_i = v_D + Ri \\ v_D = V_S \end{cases}$$

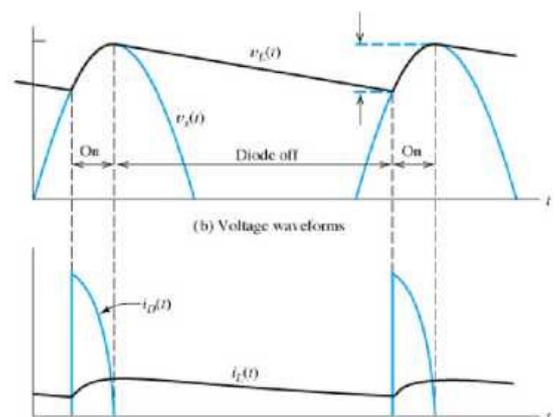
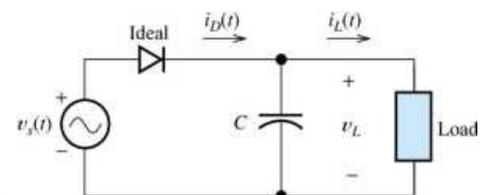
quindi $Ri = v_i - V_S$; se il diodo è reale, e $v_i < V_S$ la corrente sul diodo è nulla (interruttore aperto)

$$\begin{cases} v_i = v_D + Ri \\ i = 0 \end{cases} \quad \text{quindi } v_i = v_D$$

Per convertire una tensione DC in una AC, si può porre in uscita a un rettificatore a singola semionda un condensatore di valore elevato: assumendo che il diodo sia ideale, quando v_s raggiunge il massimo (V_m), C si carica alla tensione V_m ;

come v_s inizia a diminuire, il diodo si polarizza in inversa: $i_D \sim 0$ e sul carico scorre solo la corrente fornita dal condensatore C, che, di conseguenza, si scarica lentamente fino alla semionda positiva successiva; la corrente del diodo serve a ricaricare C. A causa dei cicli di carica e scarica, v_L contiene una componente AC (ripple: V_r =tensione picco-picco di ripple): per minimizzarla, occorre prendere una C elevata.

NB: la tensione inversa massima che può essere applicata sul diodo ($=2V_m$) deve essere minore della tensione di (rottura) breakdown del diodo



Raddrizzatori a doppia semionda

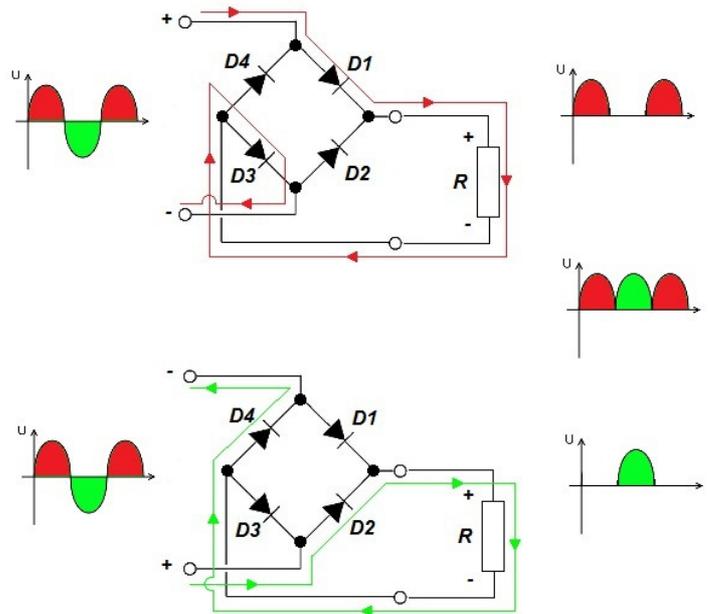
Una delle applicazioni più importanti dei diodi a semiconduttore è il raddrizzatore a doppia semionda nella configurazione a **Ponte di Graetz**.

Questo schema prevede l'impiego di 4 diodi collegati come nella figura seguente, dove sono visibili 4 nodi: due servono per collegare la tensione alternata di ingresso e due per prelevare la tensione unipolare (*raddrizzata*) di uscita.

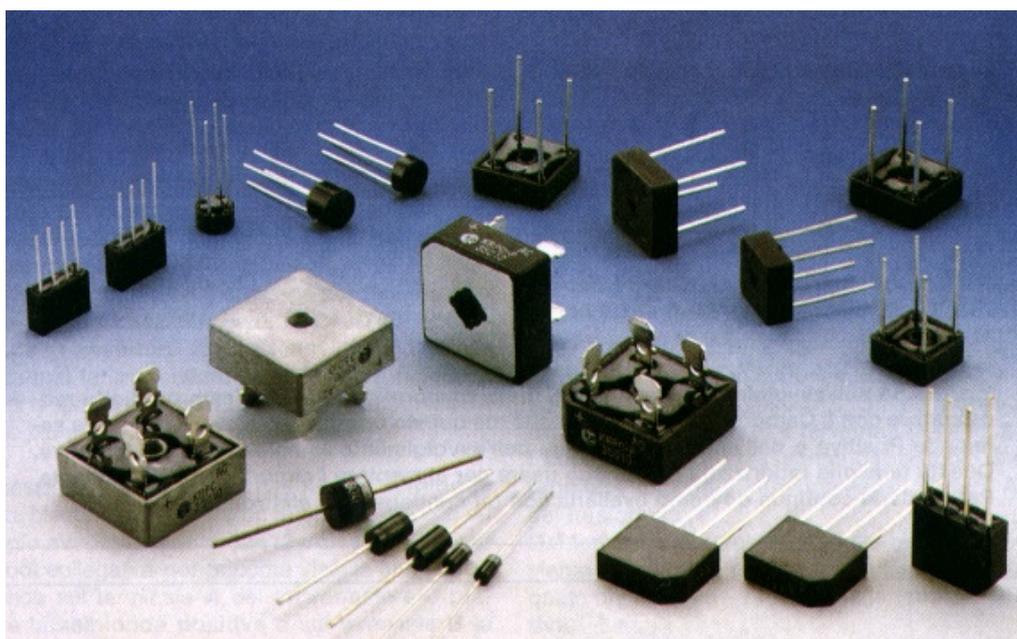
Come si può vedere, durante la semionda positiva della tensione di ingresso i soli diodi **D1** e **D3** risultano in **conduzione** (perché polarizzati direttamente) mentre **D2** e **D4** risultano **interdetti** (polarizzati inversamente) facendo seguire alla corrente il percorso **rosso**, tale cioè da attraversare la resistenza di carico R dall'alto verso il basso. Durante la **semionda negativa** della tensione di ingresso a condurre sono **D2** e **D4**, mentre **D1** e **D3** rimangono interdetti

facendo seguire alla corrente il percorso **verde**. Da notare che sulla resistenza la corrente **scorre ancora nel verso precedente** e cioè ancora dall'alto verso il basso. Per la nota legge di Ohm anche la **tensione** ai capi di questo componente avrà lo stesso segno, ovvero **sempre positiva**, a differenza della tensione di ingresso che risulta essere alternata.

In commercio esistono vari tipi ponti raddrizzatori, monofase e trifase, caratterizzati da due parametri principali: la massima **tensione inversa** e la massima **corrente** sopportabili (es. 100V/1A). Per correnti molto intense (maggiori di 10A) il dispositivo presenta un contenitore adatto al fissaggio su dissipatori termici e terminali opportunamente dimensionati. Esistono poi modelli per il montaggio su circuito stampato con terminali a saldare. Da notare infine che la **caduta di tensione** risulta **doppia** rispetto ai raddrizzatori a singola semionda in quanto per ogni ciclo si hanno sempre **due diodi in conduzione in serie**: la caduta è quindi di circa **1,2V** (la presenza di questa tensione fa **dissipare potenza** al componente che di conseguenza si scalda, soprattutto se la corrente è elevata).



<http://elettroblog.issm.it>



ponti di Graetz

DIODO LED

Il diodo Led è identico a qualsiasi altro diodo solo che a differenza di questi , ha la sola proprietà di illuminarsi e cioè di fare luce quando è attraversato da una corrente.

Per la loro costruzione si usa AsGa.

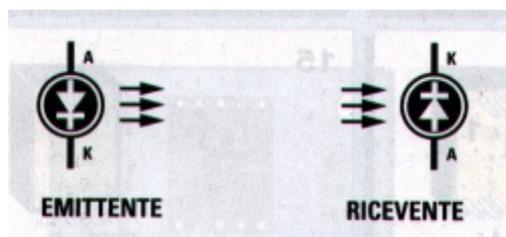
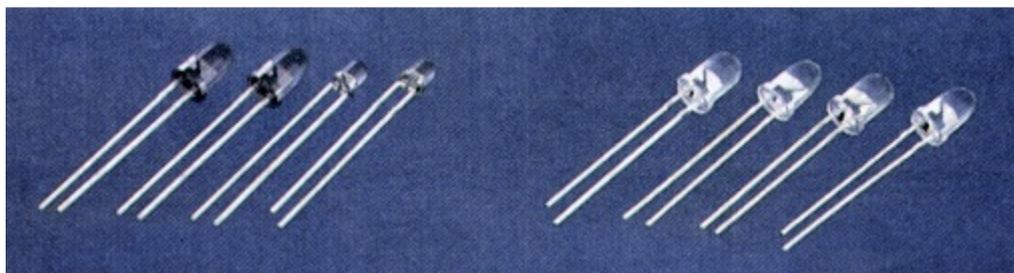
L'illuminazione può essere di colori molto diversi che vanno dal Rosso , al Verde , al Giallo , ecc.

Esistono anche diodi Led lampeggianti ed altri diodi Led che possono cambiare di colore a seconda della tensione applicata ai loro capi (Anodo e Catodo)

FOTODIODI E FOTODIODI ALL'INFRAROSSO.

I Fotodiodi sono dei diodi che entrano in conduzione (permettono il passaggio di una corrente) solo quando vengono colpiti da una fonte luminosa . Più la luminosità sale più il fotodiodo conduce.

L'accoppiamento di diodi emettitori e fotodiodi con uguale frequenza è utilizzato nei telecomandi, nelle fotocellule, negli antifurti, contagiri e automatismi in generale.



DIODI ZENER

Si è parlato del comportamento del diodo polarizzato inversamente; si è visto che, applicando al catodo una tensione positiva rispetto all'anodo, scorre soltanto una debolissima corrente, detta "corrente di drift", fino a quando la tensione applicata non raggiunge un valore tale da innescare "l'effetto valanga". Funzionando in tali condizioni, un diodo normale arriva presto alla distruzione per surriscaldamento.

E' tuttavia possibile, drogando fortemente il semiconduttore, ottenere un effetto simile all'effetto valanga, ma diverso per due aspetti fondamentali:

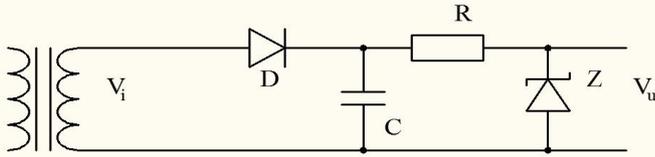
- 1- il fenomeno può ripetersi indefinitamente senza che il diodo si distrugga
- 2- il fenomeno si produce anche a tensioni basse, dell'ordine di qualche volt

Tale fenomeno, per cui, a tensione praticamente costante, si verifica un brusco aumento della corrente inversa, viene denominato "effetto Zener"; poichè il processo dipende dall'intensità del campo elettrico applicato, è possibile, modificando lo spessore dello strato a cui viene applicata la tensione, ottenere diodi zener che manifestano l'effetto valanga a tensioni diverse, in un campo che va da circa 4 volt a diverse centinaia di volt.

Grazie alle sue caratteristiche, il diodo zener viene ampiamente sfruttato per realizzare circuiti di stabilizzazione della tensione.

Osserviamo come prima particolarità che, nell'uso normale, mentre un diodo raddrizzatore viene attraversato dalla corrente nel senso anodo-catodo, un diodo zener viene inserito in circuito col catodo rivolto verso il positivo, così da essere attraversato da una corrente inversa nel senso catodo-anodo.

In figura è mostrata l'applicazione di entrambi i diodi:



D è un diodo raddrizzatore, che permette il passaggio della corrente diretta I_{dir} , solo quando la tensione presente sul suo anodo è positiva; vengono così eliminate tutte le semionde negative contenute nella tensione alternata che arriva dal trasformatore Z è un diodo zener, che ha lo scopo di stabilizzare la

tensione ad un valore costante che sarà la sua tensione di Zener; quando la tensione in arrivo tende a salire, la corrente che passa nel diodo zener aumenta in proporzione: poichè la stessa corrente passa anche nella resistenza R, ai capi di quest'ultima si determina una maggiore caduta di tensione, che compensa così l'aumento della tensione in ingresso mentre la tensione sul diodo zener, e quindi sul carico in uscita, rimane invariata.

Il circuito di figura 1 costituisce il più semplice degli alimentatori stabilizzati; il suo impiego è limitato a carichi dall'assorbimento modesto, fino a qualche decina di mA. Il valore della resistenza R può essere determinato approssimativamente con la formula:

$$(V_i - V_u) / (I_c + I_z)$$

dove V_i è la tensione d'ingresso, V_u è la tensione del diodo zener (e quindi la tensione di uscita), I_c è la massima corrente che si richiede in uscita.

I_z è la corrente minima che deve passare nel diodo zener perchè questo possa svolgere la sua azione stabilizzatrice: il suo valore cambia da un tipo di diodo all'altro, ma si aggira intorno ai 5÷10 mA.

Un diodo zener è quindi caratterizzato in primo luogo dalla tensione a cui si verifica l'effetto valanga (tensione di zener); importante è poi la massima potenza che il diodo può dissipare senza distruggersi: i diodi di uso più comune sono adatti a potenze comprese fra 0,35 e 1 o 2 W.