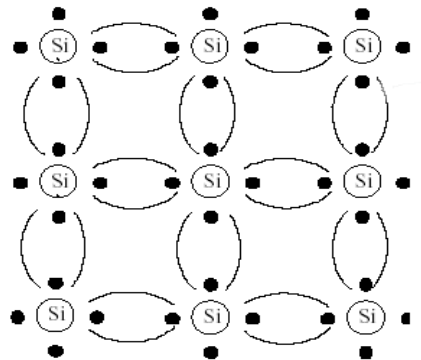


Conduttori e semiconduttori

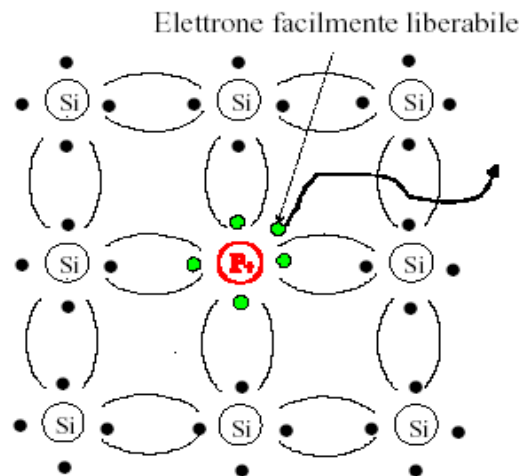
- Nei conduttori, già a temperatura ambiente gli elettroni sono liberi di muoversi nel circuito cristallino.
- Nei semiconduttori, invece, la temperatura ambiente non è sufficiente a permettere loro di rompere i legami che li legano al reticolo cristallino. Solo pochi elettroni di tanto intanto riescono a staccarsi dal reticolo, lasciando un posto vuoto che può essere occupato da un altro elettrone.
- In queste condizioni, i semiconduttori si comportano praticamente da isolanti.



Drogaggio dei semiconduttori

- Per trasformare un semiconduttore in un conduttore, si effettua il cosiddetto drogaggio: ovverosia, viene fatto crescere un cristallo di semiconduttore incorporandovi delle impurità di un elemento a valenza diversa.
 - Se si inserisce un elemento di valenza maggiore, rimane un elettrone spaiato libero di circolare: gli elettroni liberi sono in grado in questo modo di garantire la conduzione. Si parla di drogaggio di tipo **n**.

IIIB	IVB	VB	VIB
5 B Boron 10.811 $1s^2 2s^2 2p^1$ 8.0246	6 C Carbon 12.0107 $1s^2 2s^2 2p^2$ 11.2535	7 N Nitrogen 14.00674 $1s^2 2s^2 2p^3$ 14.0204	8 O Oxygen 15.9994 $1s^2 2s^2 2p^4$ 13.8136
13 Al Aluminum 26.98154 $[Ne] 3s^2 3p^1$ 6.5850	14 Si Silicon 28.0855 $[Ne] 3s^2 3p^2$ 6.1417	15 P Phosphorus 30.97376 $[Ne] 3s^2 3p^3$ 10.4867	16 S Sulfur 32.06 $[Ne] 3s^2 3p^4$ 10.3446
31 Ga Gallium 69.723 $[Ar] 3d^{10} 4s^1 4p^2$ 6.0303	32 Ge Germanium 72.64 $[Ar] 3d^{10} 4s^2 4p^2$ 7.6464	33 As Arsenic 74.9216 $[Ar] 3d^{10} 4s^2 4p^3$ 8.7593	34 Se Selenium 78.96 $[Ar] 3d^{10} 4s^2 4p^4$ 9.7524

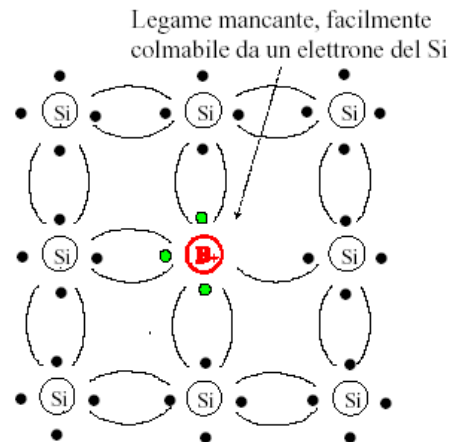


In corrispondenza dell'atomo drogante, si ha un eccesso di carica positiva

Drogaggio di tipo p

- Se si inserisce un elemento a valenza minore, rimane un posto libero per un elettrone, che può essere occupato da un elettrone degli atomi vicini: si crea allora una lacuna o buca, che si sposta nel cristallo
 - In questo modo, la conduzione è assicurata dagli elettroni che vanno a riempire le buche libere. Si parla di drogaggio di tipo **p**.

IIIB	IVB	VB	VIB
5 B Boron 10.811 1s ² 2s ² 2p ¹ 8.2990	6 C Carbon 12.0107 1s ² 2s ² 2p ² 11.2503	7 N Nitrogen 14.00674 1s ² 2s ² 2p ³ 14.0041	8 O Oxygen 15.9994 1s ² 2s ² 2p ⁴ 13.81361
13 Al Aluminum 26.98154 [Ne]3s ² 3p ¹ 0.9850	14 Si Silicon 28.0855 [Ne]3s ² 3p ² 0.1617	15 P Phosphorus 30.97376 [Ne]3s ² 3p ³ 10.4907	16 S Sulfur 32.065 [Ne]3s ² 3p ⁴ 10.2666
31 Ga Gallium 69.723 [Ar]3d ¹⁰ 4s ¹ 4p ² 0.9303	32 Ge Germanium 72.63 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ² 7.6664	33 As Arsenic 74.92160 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ³ 9.7895	34 Se Selenium 78.96 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴ 9.7524



Nei semiconduttori di tipo p, la conduzione viene descritta come se esistesse un flusso di buche, ovvero portatori di carica positivi. In corrispondenza dell'atomo drogante, si ha un eccesso di carica negativa.

Caratteristiche del drogaggio

- Solitamente, il drogaggio avviene in piccole dosi: la densità del cristallo di silicio è di circa 10^{22} atomi/cm³, mentre le concentrazioni del drogante vanno da 10^{12} a 10^{19} atomi/cm³.
- Vale la cosiddetta legge di azione di massa: se n è la densità degli elettroni spaiati, e p la densità delle lacuna, allora a temperatura ambiente il prodotto tra questi due numeri è costante, e vale:

$$n \cdot p = 2 \times 10^{20} \quad (1/\text{cm}^3)^2$$

Un po' di numeri....

- Per un cristallo puro, $n=p$, e quindi

$$n = p \cong 1.4 \times 10^{10} \quad \text{elettroni / cm}^3$$

- Per un cristallo drogato N, con n_d atomi per cm^3 , allora $n=n_d$ e quindi $p=2 \cdot 10^{20}/n_d$. Ad es.:

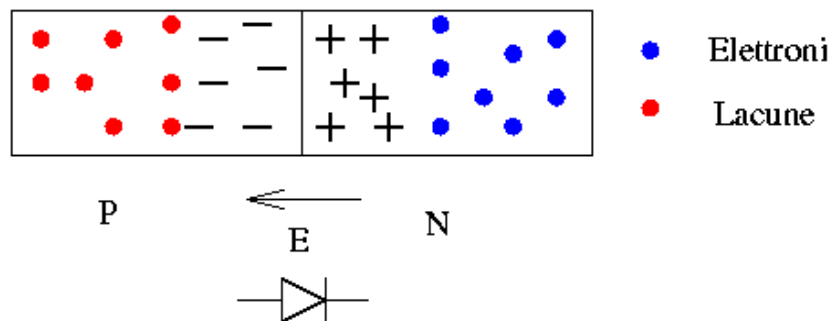
$$n_d \cong 10^{15}, \quad n \cong 10^{15}, \quad p \cong 2 \times 10^5$$

- Per un cristallo drogato P, allora con n_d atomi per cm^3 , allora $p=n_d$ e quindi $n=2 \cdot 10^{20}/n_d$

$$n_d \cong 10^{15}, \quad n \cong 2 \times 10^5, \quad p \cong 10^{15}$$

Il diodo

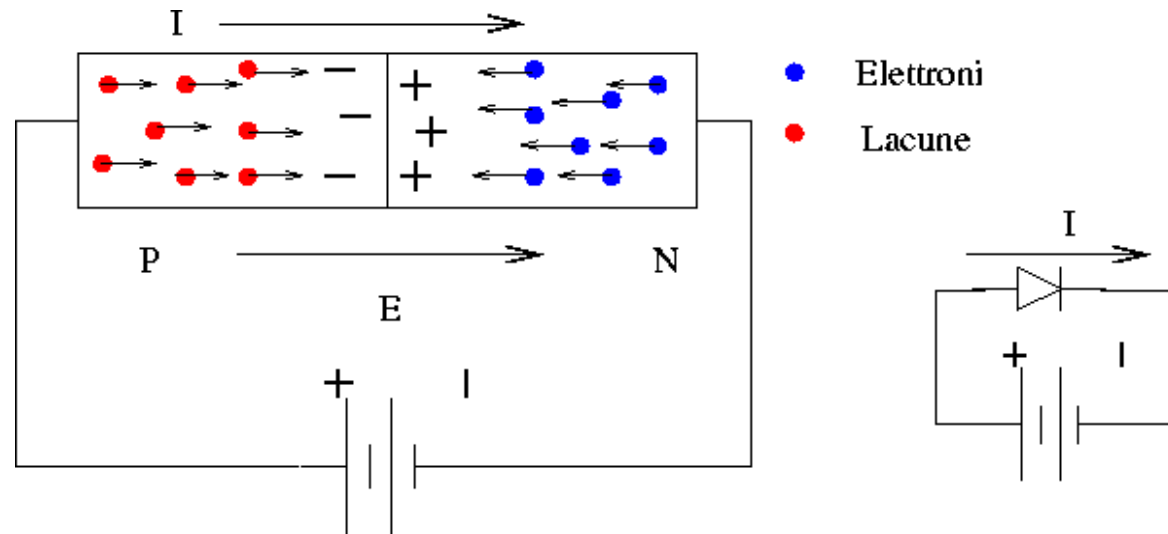
- Un diodo si ottiene ponendo a contatto un semiconduttore di tipo N con uno di tipo P. Solitamente, il contatto non è puramente meccanico: si tratta spesso di un unico cristallo drogato in modo diverso.
 - Gli elettroni liberi del semiconduttore n in prossimità della zona di contatto si precipitano ad occupare le buche del semiconduttore P: in questo modo, il semiconduttore N si carica positivamente e quello P negativamente.
 - Si forma quindi un campo elettrico diretto da N a P che si oppone ad un ulteriore passaggio di elettroni: nella zona della giunzione si forma una zona isolante detta zona di svuotamento.



Diodo polarizzato direttamente

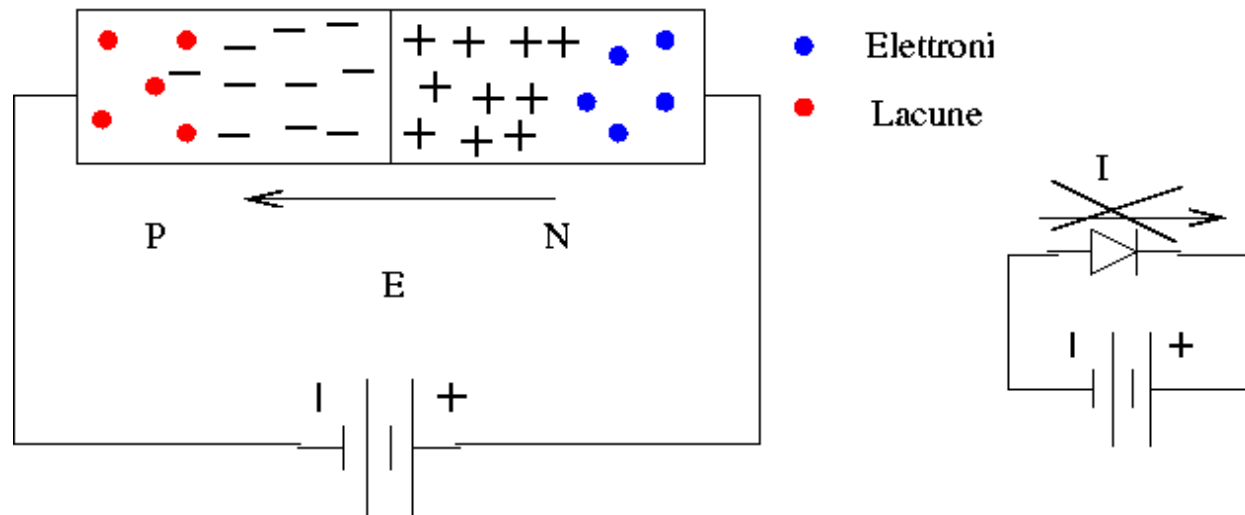
- Applicando una d.d.p. positiva al semiconduttore di tipo P le lacune vengono respinte, e si dirigono verso la zona di svuotamento. Analogamente fanno gli elettroni nel semiconduttore N. La zona di svuotamento si assottiglia, fino a che, in corrispondenza di una tensione di soglia V_s , si riempie completamente ed una corrente comincia a scorrere nel diodo.

Il diodo si dice
allora polarizzato
direttamente



Diodo polarizzato inversamente

- Se invece la d.d.p. positiva viene applicata al semiconduttore N, allora elettroni e lacune si allontanano ulteriormente dalla zona di svuotamento, che si ispessisce: il diodo rimane isolante, a meno di una piccola corrente detta corrente oscura.



Curva caratteristica del diodo

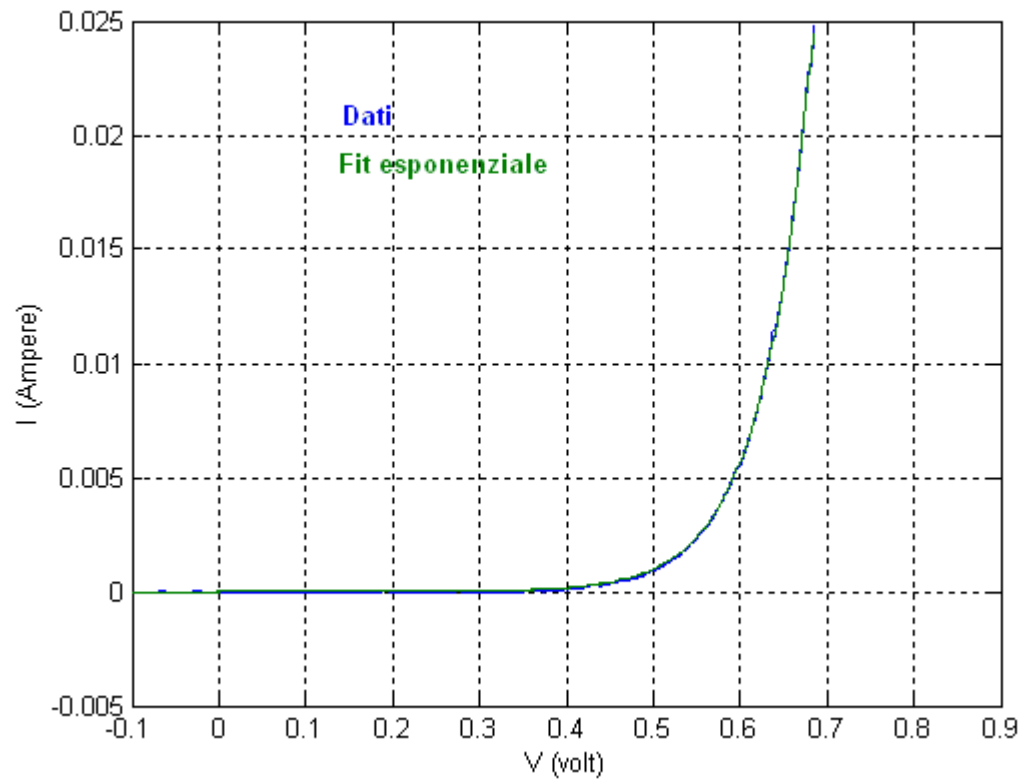
- Il modello teorico del funzionamento del diodo porta ad una relazione tensione corrente del tipo:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eV}{\eta kT}} - 1 \right)$$

- La quantità I_0 corrisponde alla corrente che si ottiene per una forte polarizzazione inversa: è la corrente oscura del diodo. E' dell'ordine del μA
- La presenza del fattore kT mostra come la conduzione del diodo sia un fenomeno dipendente dalla temperatura: se T aumenta, l'esponenziale diminuisce, e quindi la corrente aumenta: infatti cresce il numero dei portatori in grado di staccarsi dal reticolo. A temperatura ambiente, $kT/e=1/40$ Volt
- Il coefficiente η dipende dalle caratteristiche del materiale: nel diodo al silicio, vale circa 2.

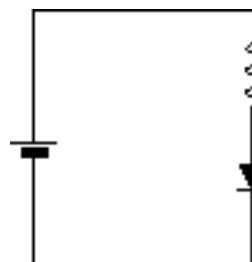
Grafico della caratteristica

- I punti blu mostrano le misure effettuate in laboratorio durante il secondo semestre del corso. La curva verde è un fit esponenziale.



Il concetto di retta di carico.

- Si consideri un circuito come quello in figura:

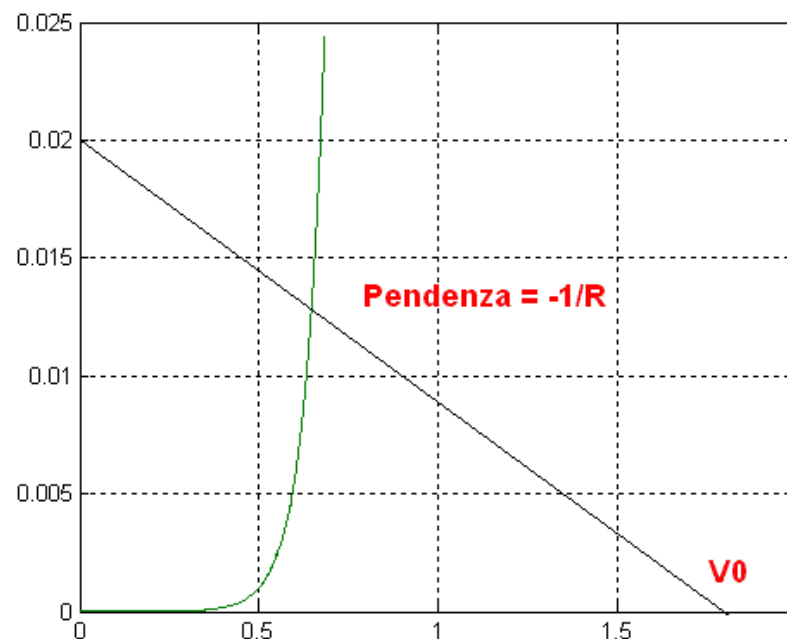


- La corrente che scorre nel circuito è legata alla tensione fornita dal generatore e a quella ai capi del diodo dall'equazione della maglia. Inoltre la tensione ai capi del diodo e la corrente che scorre in esso sono legate dalla caratteristica:

$$V_0 - RI_d - V_d = 0 \rightarrow I_d = \frac{V_0 - V_d}{R}$$

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{eV_d}{\eta kT}} - 1 \right)$$

Nel piano V_d , I_d , la prima equazione rappresenta una retta che intercetta le ordinate nel punto V_0 e di pendenza $-1/R$. L'intersezione tra questa retta e la curva caratteristica fornisce i valori di tensione e corrente cercati.



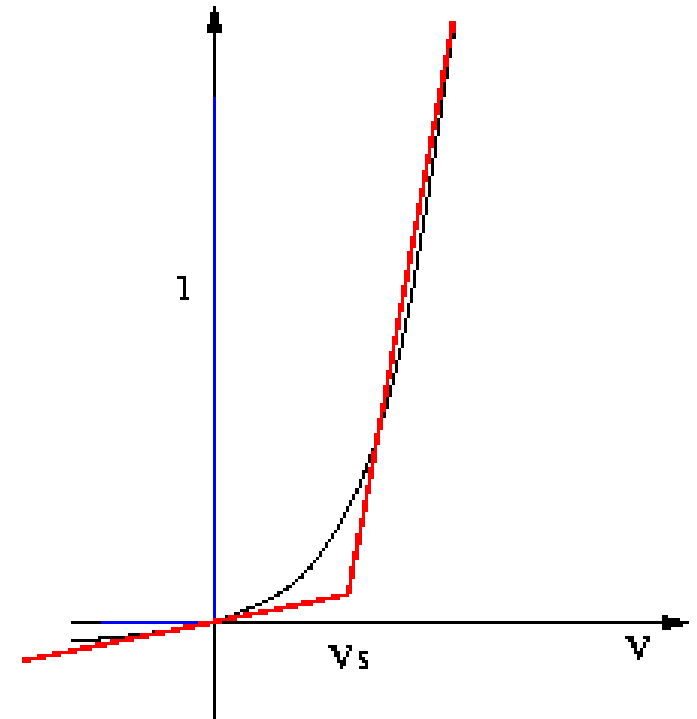
Modello lineare a tratti

- Nella pratica, si usa schematizzare il diodo come una resistenza R_d , molto piccola, quando è polarizzato direttamente, ed R_i , molto grande, quando è polarizzato inversamente.
- Il modello più semplice del comportamento del diodo si ottiene supponendo che la resistenza diretta sia nulla mentre quella inversa sia zero. Questo modello non è adatto per i calcoli, ma fornisce una guida per comprendere il comportamento di un circuito

$$V < 0 \rightarrow I = 0, \quad V > 0 \rightarrow I > 0$$

- Una approssimazione ancora migliore si ottiene tenendo conto della presenza della tensione di soglia V_s , pari a 0.2 - 0.6 V.

$$V < V_s \rightarrow I = V / R_i, \quad V > V_s \rightarrow I = (V - V_s) / R_d, \quad R_i \gg R_d$$

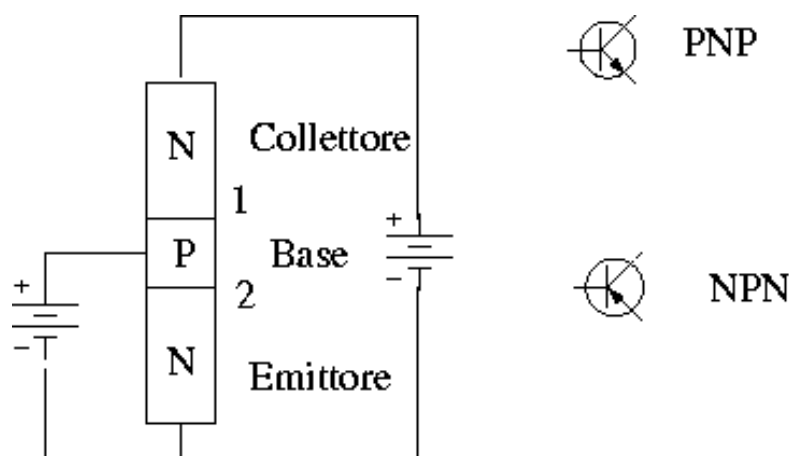


Altri tipi di diodi

- Il diodo Zener: aumentando indefinitivamente la tensione inversa, esiste un punto in cui il diodo diventa istantaneamente conduttore: questo effetto è detto effetto Zener. Questo porterebbe alla bruciatura del diodo, ma è possibile sfruttare la caratteristica per costruire degli stabilizzatori di tensione
- Diodo LED (light emitting diode): sono diodi in cui la corrente provoca emissione di luce. Analogamente, è possibile produrre luce coerente (diodi laser), o microonde (diodi Gunn).
- Diodo varicap: utilizza il diodo polarizzato inversamente come un condensatore. Variando la tensione è possibile variare la capacità.
- Rivelatori di radiazione: la corrente inversa è proporzionale alla radiazione incidente. Un caso particolare sono i fotodiodi, o i diodi Schottky che funzionano nel regime delle microonde.

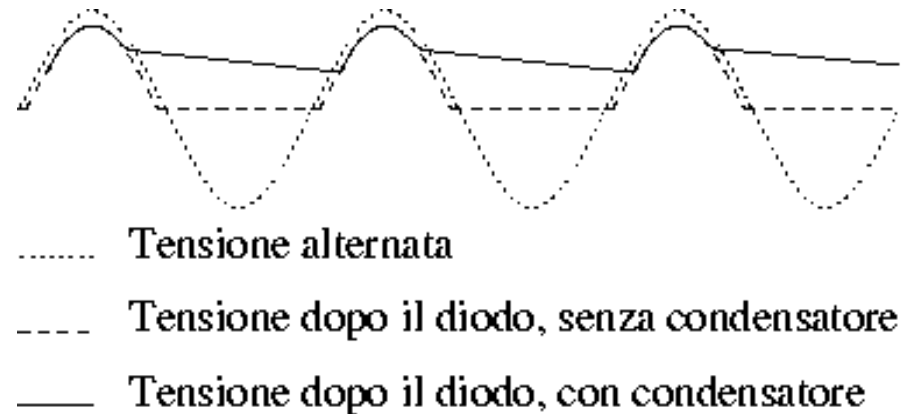
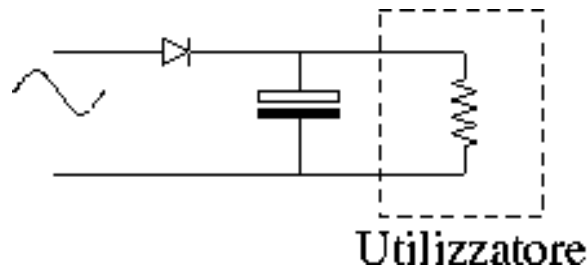
Cenni sul transistor

- Un transistor consiste in una doppia giunzione PNP o NPN.
 - Applicando una tensione tra i due estremi, una delle due giunzioni risulta polarizzata inversamente, e quindi il transistor non conduce.
 - Iniettando però una corrente attraverso il semiconduttore centrale, parte di questa raggiunge la giunzione polarizzata inversamente e va a riempire parzialmente la zona di svuotamento.
 - Il transistor diventa quindi conduttore: la corrente tra emittore e collettore risulta molto maggiore della corrente di base, ed approssimativamente proporzionale a questa: il transistor funziona come amplificatore di corrente.



Il raddrizzatore

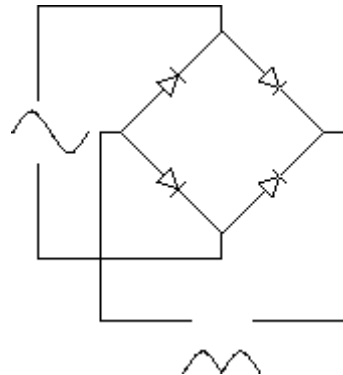
- Il circuito raddrizzatore serve per trasformare una tensione alternata in una continua.



- Il condensatore si carica attraverso il diodo, di resistenza diretta R_d , con un tempo scala dell'ordine di CR_d , e si scarica sul carico, di resistenza R_c con un tempo CR_c , molto maggiore del tempo di carica: quindi, in corrispondenza dei massimi della tensione, il condensatore si carica istantaneamente, mentre quando la tensione in ingresso diventa negativa, ed il diodo smette di condurre, il condensatore si scarica lentamente sul carico.
- Se il carico è piccolo, il condensatore si scarica molto tra un massimo e l'altro, e la tensione fluttua molto, se invece è grande, le fluttuazioni risultano ridotte.

Raddrizzatore a ponte

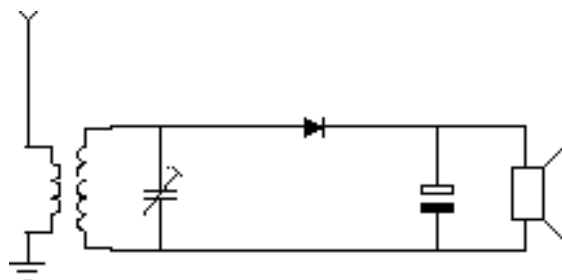
- Per diminuire le fluttuazioni, è possibile utilizzare un circuito a ponte, detto raddrizzatore a doppia semionda, che trasforma le semionde negative in semionde positive



- I raddrizzatori erano adoperati nei circuiti di alimentazione degli apparecchi elettrici per trasformare la tensione alternata di rete in quella continua necessaria al funzionamento dell'apparecchiatura. Adesso si adoperano sistemi di stabilizzazione più sofisticati.

Un esempio: la radio a galena

- La radio ricevente più semplice da realizzare è la cosiddetta radio a galena, dove il cristallo di galena costituisce un primitivo diodo:



- La radio a galena è in grado di ricevere trasmissioni in modulazione di ampiezza: l'ampiezza di un segnale ad alta frequenza (portante) viene moltiplicata per il segnale sonoro a più bassa frequenza (modulante)
- Nel circuito si riconoscono due parti: quella di sintonizzazione a sinistra e quella di rivelazione, o meglio demodulazione a destra.
- La parte di sintonizzazione non è altro che un filtro risonante LC la cui frequenza caratteristica è accordabile tramite un condensatore variabile.

Modulazione di ampiezza

- Nella cosiddetta modulazione di ampiezza il segnale radio viene formato moltiplicando una sinusoide di frequenza molto grande detta portante (almeno qualche centinaio di kHz) per il segnale sonoro, detto modulante (al max una decina di kHz). In questo modo, l'ampiezza della portante segue l'andamento della modulante

Per riottenere il segnale originale bisogna eliminare la semionda negativa della portante, e filtrare tramite un condensatore i residui di segnale ad alta frequenza.

