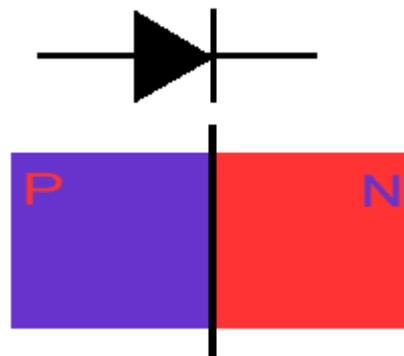


Diodo a giunzione

Da Wikipedia, l'enciclopedia libera.

Il **diodo a giunzione** è un **diodo a semiconduttore** molto diffuso nell'ambito dell'**elettronica** a stato solido. È stato il primo dispositivo a semiconduttore reso disponibile commercialmente negli **anni 1940**.

Viene realizzato utilizzando prevalentemente cristalli di **Silicio** drogati ad un'estremità (chiamata zona p) con atomi trivalenti (per es. **Boro**) ed all'altra (chiamata zona n) con atomi pentavalenti (per es. **Fosforo**). Tra la zona p e la zona n si crea una stretta zona di transizione in cui, a causa della variazione brusca nel tipo del **drogaggio del semiconduttore** (da cui il nome *giunzione p-n*), si crea una barriera di potenziale.



Nella figura precedente è schematizzato il cristallo di **Silicio**, con la zona n (a destra) drogata con gli atomi di **Fosforo** e la zona p (a sinistra) drogata con gli atomi di **Boro**; nel contempo, è possibile fare un parallelo con il **simbolo circuitale del diodo**: la zona n corrisponde alla parte a destra, quella con la sbarra orizzontale, ed il terminale corrispondente viene chiamato usualmente **catodo**, mentre la zona p corrisponde alla parte a sinistra, quella con il triangolo, ed il corrispondente terminale viene chiamato usualmente **anodo**.

Giunzione p-n

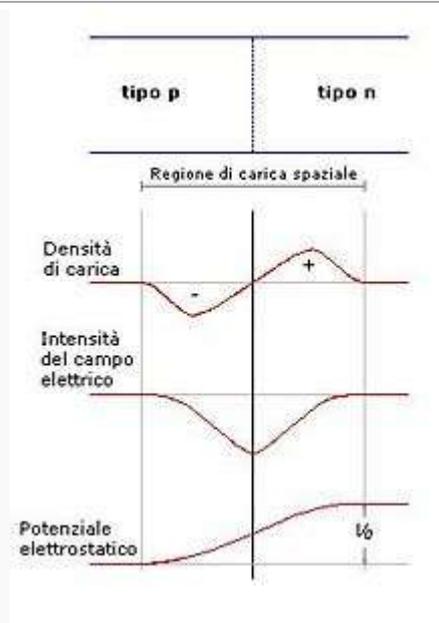


Diagramma della giunzione p-n

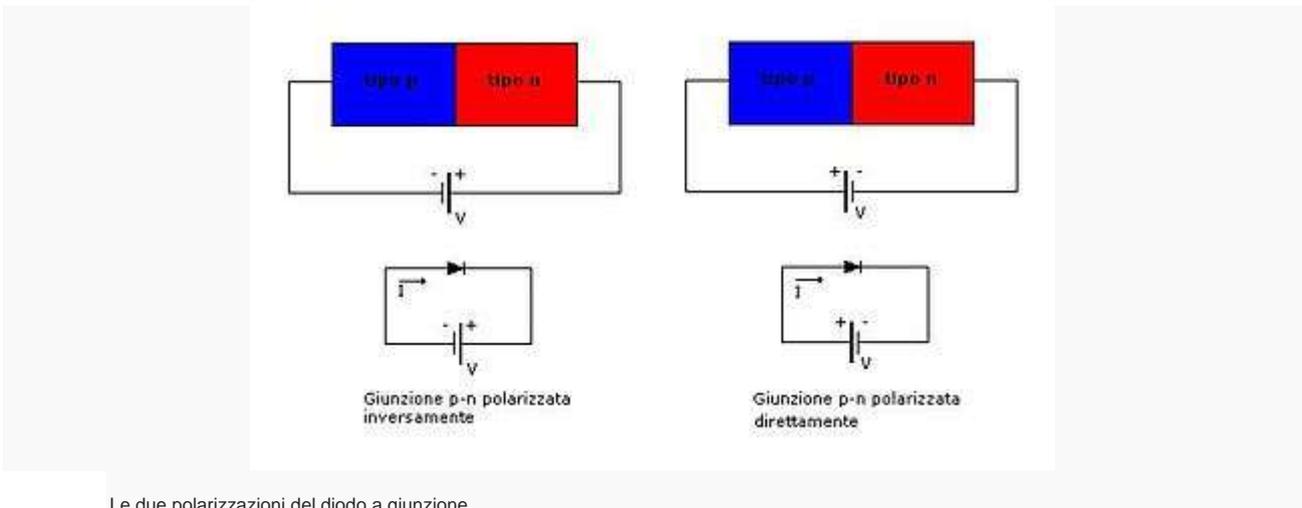
Come si vede dalla figura il diodo a giunzione tipo p-n crea intorno alla regione di carica spaziale un gradiente di carica: le **lacune** dalla zona tipo p tenderanno a spostarsi verso la zona n e viceversa gli elettroni tenderanno a spostarsi verso la zona tipo p, questo fenomeno è chiamato **diffusione**. Nel punto di giunzione avviene il fenomeno della **ricombinazione**: le lacune e gli elettroni si ricombinano e quindi si ha una piccola **regione di svuotamento** o di **transizione** o **regione di carica spaziale**. Lo spessore

di questa regione è dell'ordine di $0,5\mu m$. Immediatamente a destra e a sinistra di detta regione vi è un accumulo di cariche come indicato nel primo diagramma della figura.

Il secondo diagramma mostra il campo elettrico in modulo, che si crea nella regione di carica spaziale: esso è dovuto al **doppio strato** che si viene a formare per la presenza delle densità di cariche positive e negative accumulate in vicinanza del punto di giunzione. Questo campo elettrico ha direzione da n a p ed è negativo in modulo. Esso si oppone ad un ulteriore passaggio di cariche da una zona all'altra, cioè si oppone alla diffusione di carica e si ha equilibrio.

Nel terzo diagramma della figura si vede l'andamento del potenziale elettrostatico nella regione di carica spaziale che crea una **barriera di potenziale** che si oppone alla diffusione di cariche entro la giunzione.

Giunzione p-n polarizzata



Le due polarizzazioni del diodo a giunzione

Applicando una **tensione** V con il morsetto negativo alla zona p e con il morsetto positivo alla zona n il diodo è **polarizzato inversamente**. La presenza di questa tensione provoca un aumento della barriera di potenziale V_0+V : si ha dunque una riduzione del flusso di cariche maggioritarie, cioè gli elettroni dal lato n e le lacune dal lato p sono impediti ad attraversare la barriera. Non sono influenzati invece i portatori di carica minoritari, cioè le lacune dal lato n e gli elettroni dal lato p, che quindi contribuiscono a creare una corrente indicata in figura, chiamata **corrente di saturazione inversa** I_s .

Nella seconda figura invece i morsetti vengono ribaltati. Il morsetto positivo del generatore di tensione viene collegato al lato p e quello negativo al lato n: si ha **polarizzazione diretta**. In questo caso la tensione V viene sottratta (V_0-V), in modo che, abbassando la barriera di potenziale, non sussista più l'equilibrio, e gli elettroni della zona n (portatori maggioritari) tendano a spostarsi verso la zona p mentre viceversa le lacune dalla zona p si spostano verso la zona n: la loro somma crea una **corrente diretta** nel diodo.

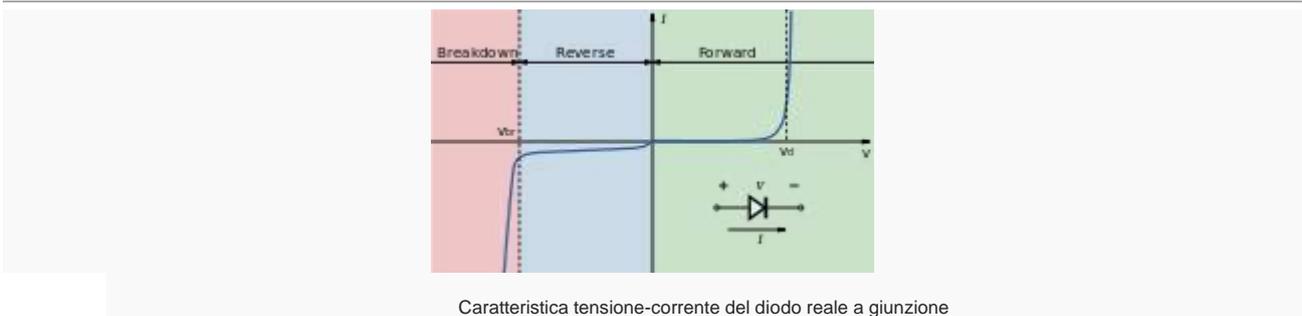
Giunzione p-n in Corto circuito

Se in entrambi i casi di polarizzazione si pone $V=0$ succede che la giunzione va in **corto circuito**: in questa situazione non vi è passaggio di corrente ($I=0$), eccetto che per un breve periodo transiente durante il quale si raggiunge l'equilibrio, e la tensione rimane quella V_0 .

Giunzione p-n come circuito aperto

Consideriamo ora solo il caso di polarizzazione diretta: se la tensione di polarizzazione diretta V diventasse uguale a $V = 0$ cioè $V = V_0$, la barriera di potenziale si annullerebbe e la corrente potrebbe viaggiare attraverso il circuito liberamente aumentando indefinitamente fino alla rottura del diodo. In realtà questo non succede perché la corrente circolante viene limitata da un certo punto in poi dai contatti ohmici ai lati del diodo e dalla resistenza intrinseca del diodo. In tal caso la tensione di polarizzazione applicata non è più relazionata alla corrente presente nel diodo ma è il risultato di componenti, come i contatti ohmici ai lati del diodo e della resistenza di massa del diodo. In questo modo il diodo si comporta come se fosse a **circuito aperto**, diventando assimilabile a un componente lineare.

Caratteristica tensione-corrente



La caratteristica reale del diodo è indicata in figura e indica diverse zone di funzionamento.

Per la parte esponenziale della caratteristica **William Bradford Shockley** trovò una relazione per modellizzare in termini matematici un'approssimazione ideale della **caratteristica tensione-corrente** di un **diodo a giunzione p-n**, denominata quindi in suo onore **equazione del diodo ideale di Shockley**.

$$i_D = I_S \left(e^{\frac{q v_D}{k T}} - 1 \right) = I_S \left(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1 \right)$$

dove:

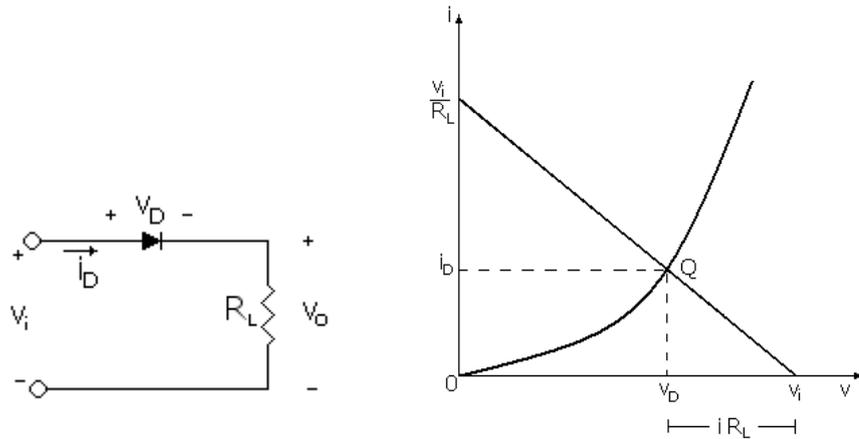
- i_D è l'**intensità di corrente** nel **diodo**;
- v_D è la **differenza di potenziale** tra i due terminali del **diodo**;
- I_S è la **intensità di corrente di saturazione**, che dipende dalle caratteristiche costruttive del **diodo**, direttamente proporzionale alla superficie della **giunzione p-n**, assumente quindi valori tipicamente variabili tra i 10^{-10} , quando le dimensioni del **diodo** sono grandi, ed i 10^{-15} , quando le dimensioni del **diodo** sono piccole.
- q è la **carica di un elettrone (carica elementare)**;
- k è la **costante di Boltzmann**;
- T è la **temperatura assoluta** sulla superficie di giunzione tra la zona p ed n ;
- $V_T = kT/q$ è la **tensione termica**; per temperature ambiente (intorno ai 300 K) vale **26 mV**.

Come si vede la particolarità del diodo è quella di condurre pochissimo al di sotto di una tensione di lavoro V_{γ} che dipende dal materiale e dal diodo e per i diodi al Si è tipicamente di 0,6 - 0,7 V. In corrispondenza della tensione di lavoro, vi è ovviamente un'unica **intensità di corrente** di lavoro, il che implica che il **diodo** deve essere correttamente dimensionato quando utilizzato nei **circuiti elettronici**, per far sì che l'intensità di corrente ai capi del dispositivo non superi mai la massima intensità di corrente prevista per quello specifico **diodo**, parametro spesso denominato **intensità di corrente nominale**.

I **diodi a giunzione p-n reali** presentano diversi fenomeni aggiuntivi che portano ad avere una caratteristica tensione corrente diversa, anche se molto simile a quella di quelli ideali. In particolare, la parte esponenziale della caratteristica presenta un esponente dimezzato per tensioni negative, piccole tensioni positive e apprezzabili tensioni positive. Inoltre, una maggiore differenza è che quando **polarizzati in inversa**, presentano un valore V_A , chiamato **tensione di rottura** o **tensione di breakdown** oltre il quale si innesca un fenomeno di moltiplicazione dei portatori di carica con conseguente brusco aumento (in valore assoluto) della corrente, tale da provocare se non controllato la distruzione del **diodo**.

Applicazioni circuitali del diodo

Determinazione del punto di lavoro



Una volta definiti i parametri del diodo, è possibile inserire il diodo come elemento circuitali. Il problema diventa la caratteristica non lineare del diodo, che non permette di conoscere immediatamente la tensione v_D e la corrente i_D del diodo. Per tale scopo si usa spesso utilizzare il metodo grafico. Basandosi sul circuito a diodo semplice nella prima figura, la caratteristica tensione-corrente in zona di conduzione è data dal grafico della seconda figura.

Applicando la [legge di Kirchhoff delle tensioni](#) all'unica maglia:

$$v_D = v_i - i_D R_L$$

dove R_L è la [resistenza](#) di carico. Questa equazione rappresenta la [retta di carico](#) (la caratteristica voltamperometrica del generatore e della resistenza), individuabile per i punti $i = 0, v_D = v_i$ e $v = 0, i_D = v_i/R_L$. L'intersezione tra la retta di carico e la caratteristica del diodo fornisce il punto di lavoro Q che identifica la tensione v_D e la corrente i_D del diodo.

Modello lineare a tratti

Spesso per le applicazioni si usa anche il modello lineare a tratti. Poiché il diodo ha due stati, cioè permette la conduzione in un solo senso, quando è polarizzato direttamente ($v > V_\gamma$) si assume per il diodo un circuito equivalente costituito da un generatore di tensione di valore V_γ , cioè del valore della [tensione di soglia](#), e da una resistenza, detta diretta, R_f di pochi decimi di ohm, cioè molto bassa.

Quando il diodo è in interdizione, cioè nello stato in cui presenta resistenza alla conduzione ($v < V_\gamma$), si assume il circuito equivalente formato da una resistenza inversa R_r molto grande, almeno centinaia di k Ω o addirittura infinita.

Applicazioni circuitali

Per le sue caratteristiche il diodo è utilizzato in molte applicazioni. Esso è utilizzato per modulare la forma d'onda di ingresso come [limitatore](#) di ampiezza, e come [comparatore](#) rispetto ad una tensione di riferimento. L'uso più comune è quello di [raddrizzatore](#) a una o a doppia semionda, cioè permette di raddrizzare la forma d'onda periodica come quella sinusoidale.

FOTODIODI

L'adozione del fotodiodo ha risolto il problema della scarsa velocità della fotoresistenza.

Si basa sull'effetto fotoelettrico di giunzione; è quindi un diodo a giunzione PN costruito in modo che la giunzione PN possa essere colpita da una radiazione luminosa.

In assenza di luce incidente il fotodiodo si comporta come un normale diodo e ha una caratteristica passante per l'origine.

In presenza di luce incidente e senza alcuna polarizzazione esterna applicata, quando la regione N del diodo viene illuminata, si generano coppie E-L e le lacune (portatori minoritari nella zona N) vicino alla zona di svuotamento vengono trascinate via attraverso la giunzione. Questo flusso di lacune produce una fotoconduzione.

Se viene illuminata la regione P, anche in questo caso si generano coppie E-L, ma questa volta sono gli elettroni più vicini alla zona di svuotamento (minoritari nella zona P) che trascinati producono una fotocorrente.

In pratica le due regioni P e N vengono illuminate simultaneamente, i due fenomeni descritti precedentemente sono quindi concomitanti, si avranno allora due fotocorrenti che sommandosi danno vita ad una Fotocorrente Totale.

L'effetto di questa fotocorrente sulla caratteristica del diodo è quello di farla traslare verso il basso. La corrente inversa di dispersione

(o saturazione), viene a sommarsi alla fotocorrente, aumentando quindi notevolmente.

La fotocorrente dipende dall'illuminazione del fotodiodo, è quindi proporzionale ad esso ed anche al numero di portatori di carica generati, direttamente connessa con questa.

In polarizzazione inversa la corrente è da attribuirsi praticamente solo a portatori di minoranza perché la concentrazione dei portatori di maggioranza supera di molto quella dei minoritari e quindi con la creazione di nuove coppie E-L, per effetto della radiazione, l'aumento percentuale dei portatori maggioritari è molto più piccolo di quello dei minoritari.

E' giustificato quindi trascurare l'aumento di densità dei maggioritari e considerare che la variazione equivalga solo ad "un iniettore di portatori minoritari", che diffondono verso la giunzione, la attraversano e contribuiscono alla corrente (i maggioritari sono bloccati dalla barriera di potenziale!).

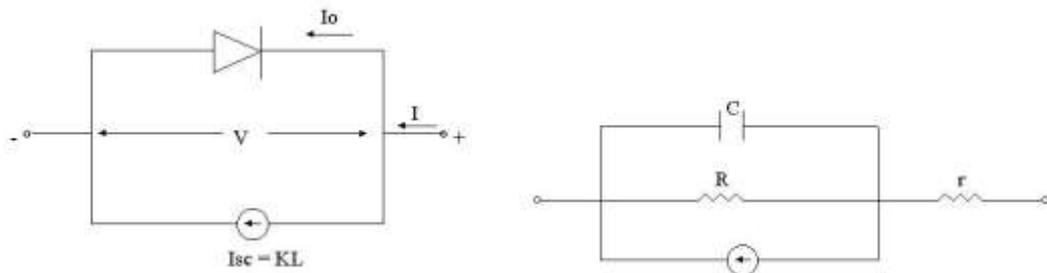
Circuito equivalente di un fotodiodo:

Analizzando il comportamento di un fotodiodo è possibile ricavarne un modello e quindi un circuito equivalente.

Dal fatto che quando funziona in modo fotoconduttivo la corrente è praticamente indipendente dal valore della tensione di polarizzazione inversa quindi è possibile schematizzare un circuito equivalente in cui l'elemento attivo sia un generatore di corrente:

$$I_{sc} = KL$$

Proporzionale quindi al flusso luminoso L della luce incidente .



Circuito equivalente differenziale

Il diodo è stato sostituito con R =Resistenza inversa, C =Capacità di transizione e con r si tiene conto della resistenza ohmica del materiale semiconduttore.

$$R \cong 50 \text{ M}\Omega, C \cong 10 \text{ pF}, r \cong 100 \Omega, K = 10 \div 50 \text{ mA/Lumen.}$$

Il fotodiodo può essere usato sia come dispositivo fotoconduttore sia come dispositivo fotovoltaico (converte la potenza radiante in potenza elettrica).

In polarizzazione Inversa □ Fotoconduttore

La tensione di uscita viene prelevata ai capi di un carico utilizzatore serie RL.

La radiazione luminosa incidente viene considerata come un iniettore di portatori minoritari, questi diffondono verso la giunzione, la attraversano e contribuiscono al flusso di corrente.

In condizioni di buio e in polarizzazione inversa il diodo è attraversato solo dalla corrente inversa di saturazione I_0 (portatori minoritari di natura termica); illuminando la giunzione PN, ma sempre in polarizzazione inversa il numero delle nuove coppie E-L è proporzionale al numero dei fotoni incidenti. Quindi in condizioni di polarizzazione elevata ma inversa la corrente che scorre nel diodo è:

$$I = I_0 + I_{sc}$$

Con I_{sc} corrente di cortocircuito proporzionale all'intensità luminosa.

La caratteristica tensione-corrente sarà quindi data da:

$$I = I_{sc} + I_0 (1 - e^{-V/\eta V_T})$$

Dove I , I_0 , I_{sc} rappresentano i valori delle correnti inverse .

V è $V > 0$ per polarizzazioni dirette.

V è $V < 0$ per polarizzazioni inverse.

$\eta = 1$ Germanio (Ge).

$\eta = 2$ Silicio (Si).

V_T è l'equivalente in tensione della temperatura.

In Polarizzazione Diretta \Rightarrow Dispositivo Fotovoltaico

Se si applica una polarizzazione diretta, la barriera di potenziale si abbassa e la corrente dei portatori di maggioranza aumenta rapidamente. Quando la corrente dei portatori di maggioranza diventa uguale alla corrente dei portatori di minoranza, la corrente come potenziale totale si annulla. La tensione per cui avviene quanto detto (corrente risultante nulla) è nota come potenziale fotovoltaico o tensione a vuoto. Poiché è noto che non può fluire corrente in condizioni di circuito aperto, la F.E.M. fotovoltaica si manifesta ai capi dei terminali aperti della giunzione PN (tensione a vuoto). Questo potenziale è dell'ordine di 0,5V per il Silicio mentre è di 0,1V per il Germanio. La tensione fotovoltaica V_{max} si manifesta in un diodo a circuito aperto ed è pari a:

$$V_{max} = \eta V_T \ln (1 + I_{sc}/I_0)$$

Ottenuta dalla formula $I = I_{sc} + I_0 (1 - e^{-V/\eta V_T})$ ponendo $I=0$; poiché risulta $I_{sc}/I_0 \gg 1$ V_{max} cresce con legge logaritmica in funzione di I_{sc} e cioè dell'illuminazione.

Applicazioni:

Il fotodiodo trova applicazione nei sistemi rivelatori di luce, negli interruttori pilotati dalla luce, nei lettori veloci di schede, etc.