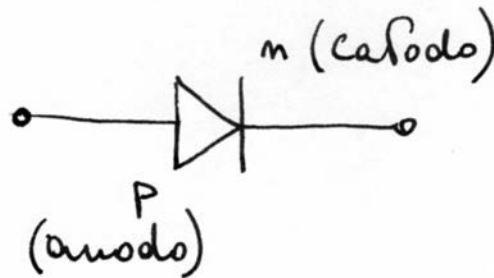


IL DIODO A SEMICONDUCTORE e' un elemento circuitale a due terminali formato da una regione di materiale semiconduttore estrinseco di tipo p (detta zona p o anodo) adiacente a una regione di materiale semiconduttore estrinseco di tipo n (detta zona n o catodo)

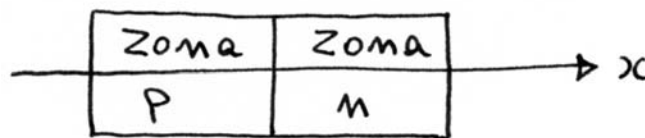
Simbolo circuitale:



La superficie di separazione tra le due regioni e' detta giunzione pn.

La **DIFFUSIONE** è il fenomeno per cui i portatori liberi di carica tendono a muoversi dalla regione a più alta concentrazione verso la regione a più bassa concentrazione dando luogo a correnti (dette "di diffusione") dirette dalla zona p verso la zona n.

Assumendo un asse x diretto come in figura



le densità di corrente di diffusione, rispettivamente per le lacune e per gli elettroni, sono date dalle relazioni

$$J_p^{diff} = (+q) D_p \left(- \frac{dp}{dx} \right) = -q D_p \frac{dp}{dx}$$

$$J_n^{diff} = (-q) D_n \left(- \frac{dn}{dx} \right) = q D_n \frac{dn}{dx}$$

dove le costanti di proporzionalità D_p e D_n sono dette "diffusività"

Le mobilità μ_n e μ_p sono legate alle diffusività D_n e D_p attraverso la relazione di Einstein

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q} = V_T$$

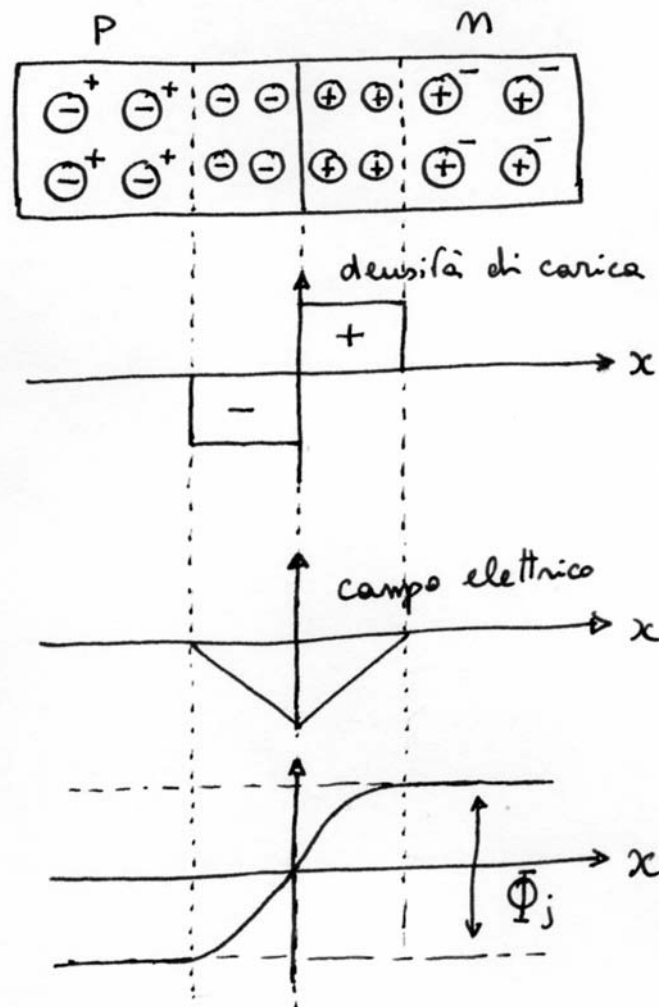
dove k è la costante di Boltzmann e T e' la temperatura assoluta.

La grandezza V_T è detta "tensione termica". A temperatura ambiente ($T = 300$ K) $V_T = 0,025$ V

A seguito del fenomeno della diffusione, nelle immediate vicinanze della giunzione si forma una zona svuotata di portatori mobili e, quindi, elettricamente carica per la presenza degli atomi impurità ionizzati (regione di svuotamento o di carica spaziale).

Alle due distribuzioni spaziali di carica di segno opposto è associato un campo elettrico diretto dalla zona n verso la zona p (e quindi nel verso opposto a quello dell'asse x di figura).

Tra le regioni n e p del diodo viene a stabilirsi una differenza di potenziale (detto "potenziale di giunzione" o "potenziale intrinseco").



$$\Phi_j = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right)$$

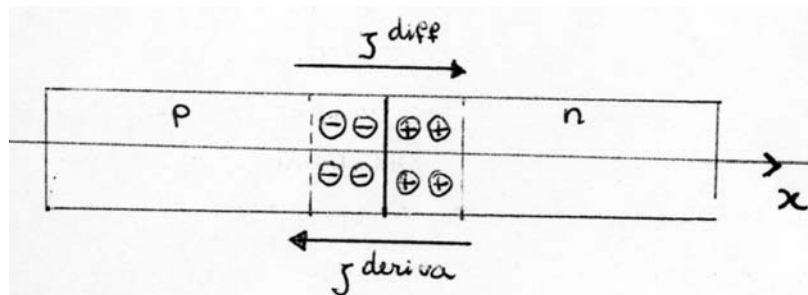
alla temperatura di 25 °C, Φ_j è circa 0,7 V per il silicio e circa 0,3 V per il germanio.

Il potenziale di giunzione costituisce una barriera che si oppone alla ulteriore diffusione delle cariche dando luogo ad una corrente di deriva (diretta dalla zona n verso la zona p) che controbilancia la corrente di diffusione.

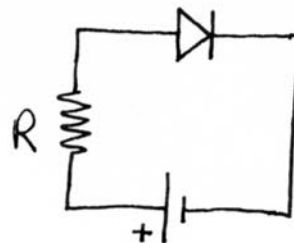
L'equilibrio dinamico tra le due correnti si ha quando

$$q n \mu_n E_x = -q D_n \frac{dn}{dx}$$

$$q p \mu_p E_x = q D_p \frac{dp}{dx}$$

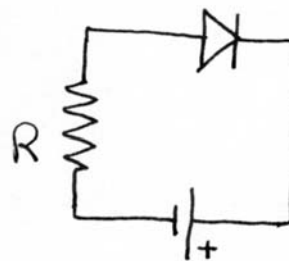


Applicando al diodo una tensione esterna che renda l'anodo più positivo rispetto al catodo (polarizzazione diretta)



si riduce l'altezza della barriera di potenziale alla giunzione.

Applicando al diodo una tensione esterna che renda l'anodo più negativo rispetto al catodo (polarizzazione inversa)



si aumenta l'altezza della barriera di potenziale alla giunzione.

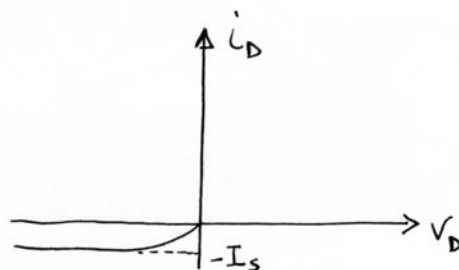
In entrambi i casi, la modifica della barriera di potenziale perturba le condizioni di equilibrio alla giunzione e provoca un flusso di corrente ai terminali.

L'andamento della corrente i_D che scorre nel diodo in funzione della ddp v_D ai suoi capi (caratteristica i-v) è non lineare ed è rappresentata dall'equazione (detta "equazione del diodo")

$$i_D = I_S \left[\exp\left(\frac{v_D}{n V_T}\right) - 1 \right]$$

dove I_S è detta "corrente di saturazione inversa del diodo" e n è un parametro adimensionale detto "fattore di idealità" che può assumersi unitario per la maggior parte dei casi.

Per il diodo funzionante in polarizzazione inversa ($V_D < 0$), la corrente che fluisce nel diodo è molto piccola e approssimativamente uguale a I_S : diodo "spento" ("off")



In un diodo reale, la corrente inversa è maggiore di I_S e cresce leggermente al crescere del modulo di V_D

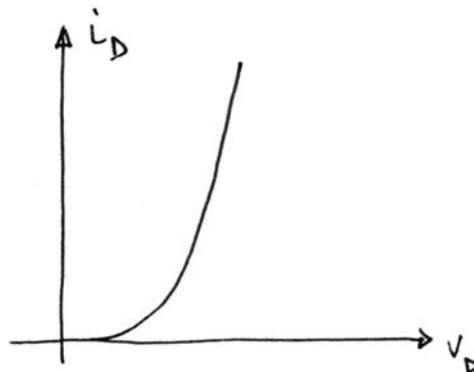
Per il diodo funzionante in polarizzazione diretta ($V_D > 0$), la corrente i_D che scorre nel diodo cresce molto rapidamente per $V_D > V_{on}$ (V_{on} è detta "tensione di accensione" o di "soglia").

Per il silicio si può assumere $V_{on} = 0,7$ V.

Dall'equazione del diodo si ha l'espressione approssimata

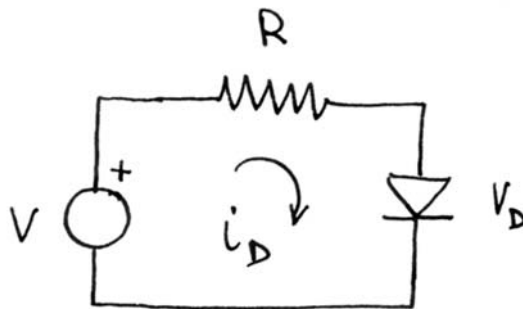
$$i_D \approx I_S \exp\left(\frac{v_D}{V_T}\right)$$

la cui caratteristica i-v è



ANALISI DEI CIRCUITI A DIODI

Per il circuito di figura

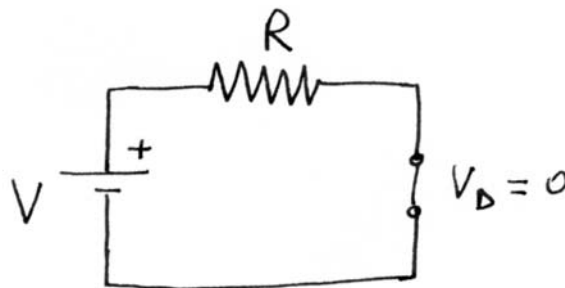


cui corrisponde la retta di carico

$$V = R i_D + V_D$$

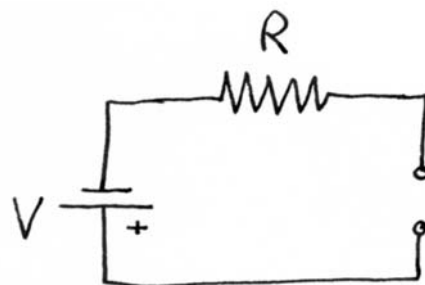
il punto Q (di “quiescenza” o di “lavoro”) è determinato dalla coppia di valori (V_D, i_D) che soddisfano contemporaneamente l’equazione della caratteristica i-v e l’equazione della retta di carico.

MODELLO LINEARE A TRATTI PER IL DIODO IDEALE



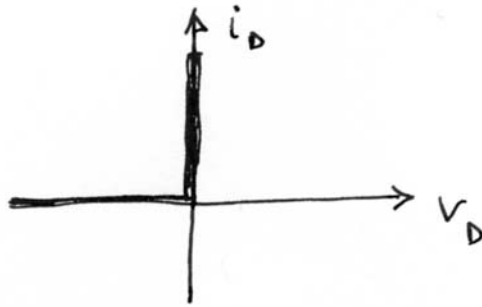
In polarizzazione diretta:

diodo = corto circuito (stato di conduzione: “on”)



in polarizzazione inversa:

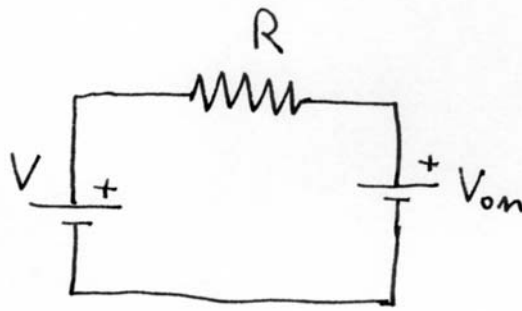
diodo = circuito aperto (stato di interdizione: “off”)



caratteristica i-v

MODELLO A CADUTA DI TENSIONE COSTANTE

La conduzione del diodo in polarizzazione diretta ha luogo soltanto quando v_D supera la tensione di accensione V_{on} (assunta pari a 0,7 V per il silicio): $(i_D = 0)$ per $(v_D \leq v_{on})$



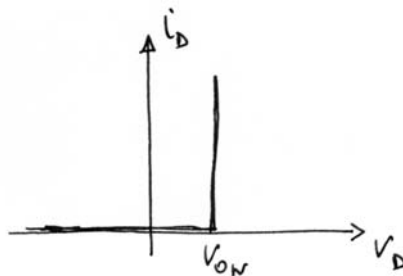
in polarizzazione diretta ($v_D > 0$)

$$(v_D = v_{on}) \text{ per } (i_D > 0)$$

(stato di conduzione "on")

in polarizzazione inversa ($v_D < 0$)

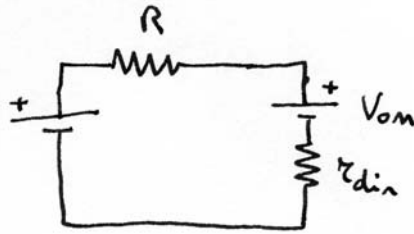
diodo = circuito aperto
(stato di interdizione : "off")



Caratteristica i-v

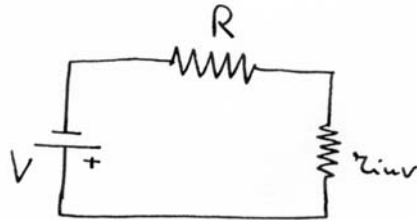
Un ulteriore livello di accuratezza può essere raggiunto considerando anche la piccola resistenza ohmica r_{dir} presentata dal diodo in polarizzazione diretta e l'elevata resistenza ohmica r_{inv} presentata dal diodo in polarizzazione inversa.

In polarizzazione diretta ($V_D > V_{on}$)

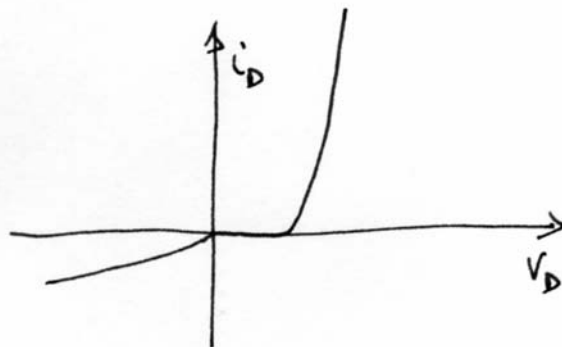


$$V_D = V_{on} + i_D \cdot r_{dir}$$

In polarizzazione inversa ($V_D < 0$)



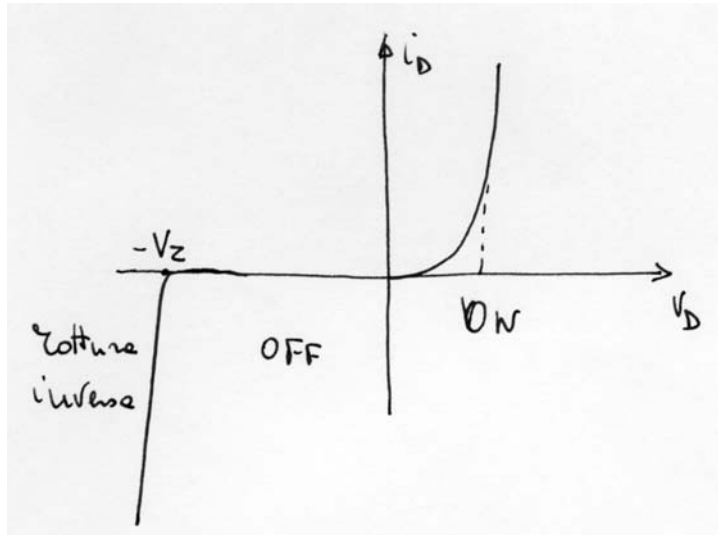
$$V_D = -i_d r_{inv}$$



caratteristica $i-v$

ROTTURA DEL DIODO IN POLARIZZAZIONE INVERSA

Per un valore della tensione inversa ($V_D < 0$) pari in modulo a un valore V_Z (detto “tensione di rottura”) il diodo entra nella regione detta di rottura inversa, dove la corrente inversa aumenta rapidamente mentre la tensione resta quasi costante.



I diodi progettati per funzionare nella regione di rottura sono detti diodi Zener
Il loro simbolo circuitale è



Esistono due diversi meccanismi di rottura

- la moltiplicazione a valanga

causata dalle collisioni all'interno della zona di svuotamento tra i portatori liberi accelerati dal campo elettrico e gli atomi fissi del reticolo cristallino.

Nei diodi al silicio si verifica per $V_Z > 5,6$ Volt

- l'effetto Zener

consiste nel passaggio diretto dei portatori della banda di valenza a quella di conduzione, per azione dell'intenso campo elettrico.

Nei diodi al silicio, si verifica per $V_Z < 5,6$ Volt

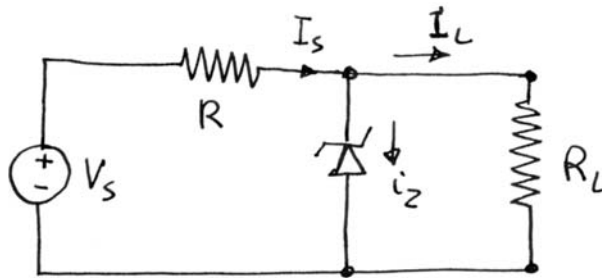
MODELLO DEL DIODO IN REGIONE DI ROTTURA

È costituito da un generatore di tensione V_z in serie con una resistenza R_z (di basso valore) che determina l'elevata pendenza della caratteristica nella zona di rottura.

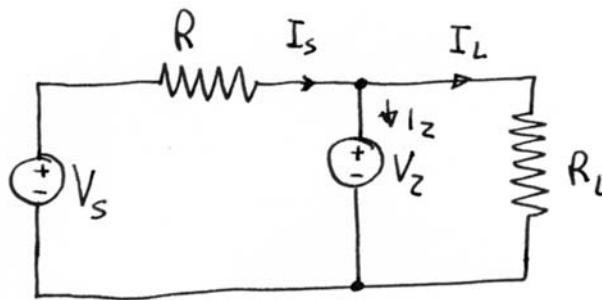


Nella regione di rottura la tensione ai capi del diodo resta approssimativamente costante e pari a V_z .

DIODO ZENER COME REGOLATORE DI TENSIONE



considerando R_z praticamente uguale a zero avremo un circuito del tipo



Il diodo mantiene una tensione costante ai capi di R_L purché

$$I_{ZMIN} \leq I_z \leq I_{ZMAX}$$

Per verificare questa condizione, tenendo conto che

$$I_z = I_s - I_L = \frac{V_s - V_z}{R} - \frac{V_z}{R_L}$$

occorre che il carico sia tale che

$$R_L > R_{L_{MIN}} = \frac{V_Z}{\frac{V_S - V_Z}{R} - I_{Z_{MIN}}}$$

La tensione sul carico è stabilizzata per valori di V_S tali che

$$V_{S_{MIN}} \leq V_S \leq V_{S_{MAX}}$$

$$V_S = R \left(I_Z + \frac{V_Z}{R} + \frac{V_Z}{R_L} \right) \rightarrow \begin{cases} I_Z = I_{Z_{MIN}} \Rightarrow V_{S_{MIN}} \\ I_Z = I_{Z_{MAX}} \Rightarrow V_{S_{MAX}} \end{cases}$$

DIODO COME FOTORIVELATORE (FOTO DIODO)

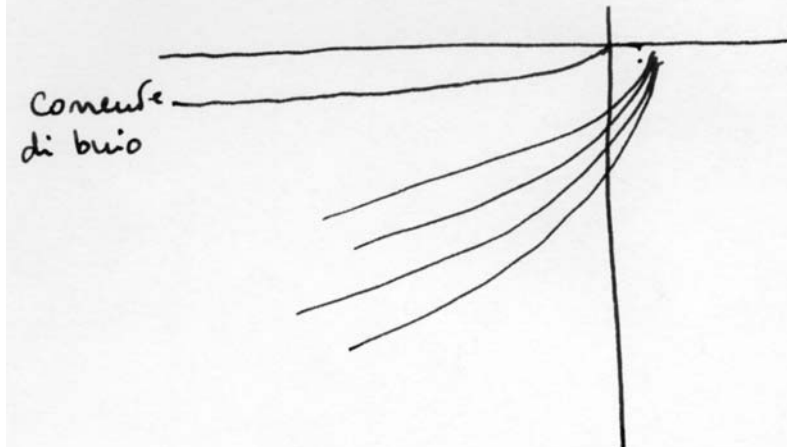
Illuminando con radiazione di frequenza

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \geq \frac{E_G}{h}$$

$$h = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \text{ (costante di Planck)}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/sec} \text{ (Velocità di propagazione delle onde em nel vuoto)}$$

la regione di svuotamento di un diodo polarizzato inversamente, la generazione di coppie elettrone-lacuna dà luogo a una corrente i_{ph} di ampiezza proporzionale all'ampiezza della radiazione incidente, che si sovrappone alla corrente inversa in assenza di radiazione (corrente di buio).



DIODI EMETTITORI DI LUCE (Light Emitting Diode, LED)

In un diodo polarizzato direttamente, se la corrente è sufficientemente elevata, la ricombinazione delle cariche dà luogo a produzione di energia.

Nei semiconduttori composti GaAs e GaAsP, l'energia può essere emessa sotto forma di radiazione
Simbolo circuitale

