

CORRENTI NEL DIODO

Per il calcolo della corrente nel diodo in presenza di una tensione di polarizzazione esterna facciamo le seguenti ipotesi semplificative:

1. i contatti metallo-semiconduttore con le zone p ed n sono di tipo ohmico, ovvero ad essi è associata una caduta di tensione proporzionale alla corrente; tale caduta di tensione si considera trascurabile;
2. la conducibilità delle regioni quasi neutre (regioni esterne alla regione di svuotamento, RCS) p ed n è tale da poter trascurare la caduta di tensione ad esse associata causata dal passaggio della corrente (ipotesi verificata per bassi livelli di corrente);
3. la regione di carica spaziale risulta svuotata di portatori liberi (ipotesi di svuotamento completo), inoltre si trascura la generazione e ricombinazione di coppie elettrone-lacuna nella RCS;
4. in caso di polarizzazione diretta, la concentrazione di cariche minoritarie iniettate (lacune iniettate nella zona n ed elettroni iniettati nella zona p) è di alcuni ordini di grandezza inferiore rispetto alla concentrazione delle cariche maggioritarie, condizione che prende il nome di *basso livello di iniezione*.

Polarizzazione diretta.

Nel caso di polarizzazione diretta della giunzione p-n, con le ipotesi 1. e 2., la tensione applicata esternamente cade tutta ai capi della regione di carica spaziale alterando il potenziale di giunzione. Una tensione V_D positiva tra anodo e catodo riduce la barriera di potenziale alla giunzione favorendo così il passaggio di cariche per diffusione: elettroni dalla zona n diffondono nella zona p e lacune dalla zona p diffondono nella zona n. A mano a mano che queste cariche minoritarie diffondono si ricombinano con le cariche maggioritarie dando luogo ad una distribuzione di portatori minoritari che diminuisce allontanandosi dalla giunzione, secondo quanto mostrato in figura 1. Si può dimostrare che l'eccesso di cariche minoritarie ($p_n(x) - p_{n0}$ e $n_p(x) - n_{p0}$) rispetto alla situazione di equilibrio diminuisce con legge esponenziale secondo le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} p_n(x) - p_{n0} &= (p_n(x_n) - p_{n0}) e^{-\frac{x-x_n}{L_p}} & \text{per } x > x_n \\ n_p(x) - n_{p0} &= (n_p(-x_p) - n_{p0}) e^{\frac{x+x_p}{L_n}} & \text{per } x < -x_p \end{aligned} \quad (1)$$

dove L_p ed L_n sono le lunghezze di diffusione delle lacune nella zona n e degli elettroni nella zona p, rispettivamente. Tali lunghezze rappresentano la distanza media percorsa da una carica minoritaria prima che questa si ricombini con una carica maggioritaria e sono legate alla costante di diffusione attraverso la seguente relazione:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$
(2)

dove τ_n e τ_p sono i tempi di vita media di elettroni e lacune, rispettivamente (tempo di vita medio tra l'istante di iniezione e l'istante di ricombinazione con una carica maggioritaria).

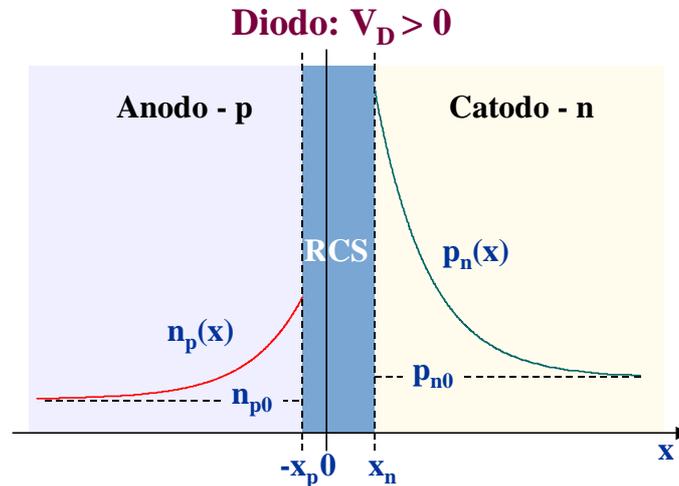


Figura 1

Il livello di elettroni $n_p(-x_p)$ iniettato nella zona p ed il livello di lacune iniettato nella zona n $p_n(x_n)$ dipendono dalla tensione applicata alla giunzione (variazione rispetto al potenziale di contatto intrinseco ϕ_j) che nelle ipotesi considerate coincide con la tensione di polarizzazione esterna. Tale legame è espresso dalle relazioni seguenti, che prendono il nome di *legge della giunzione*:

$$n_p(-x_p) = n_{p0} e^{\frac{V_D}{V_T}}$$

$$p_n(x_n) = p_{n0} e^{\frac{V_D}{V_T}}$$
(3)

dove $V_T = \frac{kT}{q}$ è il potenziale termico ($\approx 25\text{mV}$ a temperatura ambiente).

Sostituendo la (3) nella (1) otteniamo:

$$p_n(x) - p_{n0} = p_{n0} \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) e^{-\frac{x-x_n}{L_p}} \quad \text{per } x > x_n$$

$$n_p(x) - n_{p0} = n_{p0} \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) e^{\frac{x+x_p}{L_n}} \quad \text{per } x < -x_p$$
(4)

Le correnti di diffusione di minoritari associate a tale distribuzione di concentrazione di portatori, entrambe dirette da anodo a catodo, sono date dalle seguenti espressioni:

$$I_{pn}^{\text{diff}}(x) = -AqD_p \frac{dp_n(x)}{dx} = AqD_p \frac{p_{n0}}{L_p} \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) e^{-\frac{x-x_n}{L_p}} \quad \text{per } x > x_n$$
(5.a)

$$I_{np}^{diff}(x) = AqD_n \frac{dn_p(x)}{dx} = AqD_n \frac{n_{p0}}{L_n} \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) e^{\frac{x+x_p}{L_n}} \quad \text{per } x < -x_p \quad (5.b)$$

Dalle equazioni (5) si può osservare che le correnti di diffusione di minoritari sono massime ai bordi della RCS e tendono a zero allontanandosi dalla giunzione. Dato che la corrente nel diodo deve essere costante ed indipendente dalla posizione x , il calo della corrente di diffusione viene compensato da una corrente di portatori maggioritari. In generale tale corrente di maggioritari è composta da una componente di diffusione e una componente di deriva. Quest'ultima è dovuta al debole campo elettrico presente nelle regioni quasi neutre (è evidente, infatti, che lontano dalla regione di svuotamento essendo la concentrazione dei portatori costante le correnti di diffusione sia dei minoritari che dei maggioritari sono nulle, e la corrente del diodo è interamente dovuta alla componente di deriva associata alle cariche maggioritarie). Si può dimostrare che nell'ipotesi di basso livello di iniezione, la corrente di deriva dei minoritari (dovuta al debole campo elettrico nelle regioni quasi neutre) risulta trascurabile rispetto alla componente di diffusione data dalla (5). L'andamento delle varie componenti di corrente è mostrato in figura 2.

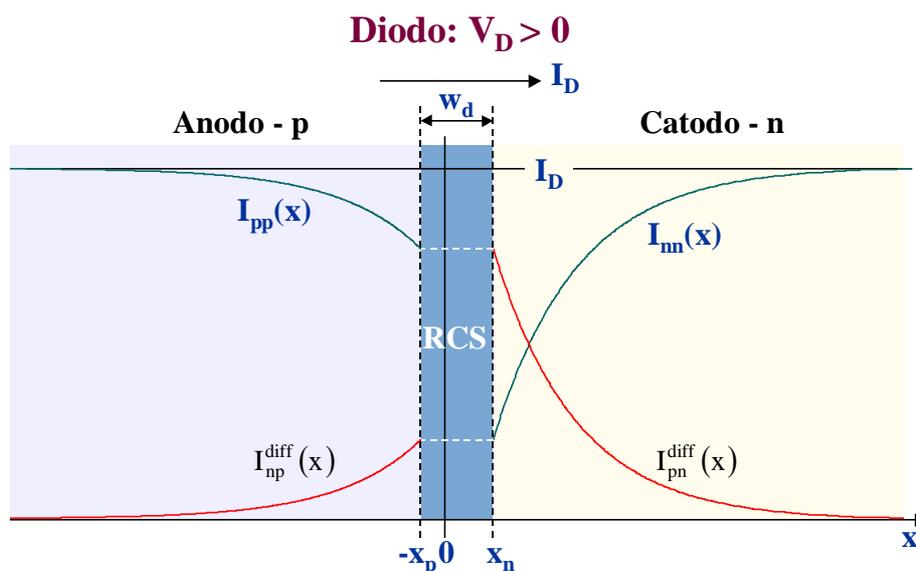


Figura 2

Come si può osservare, la corrente dovuta alle lacune (cariche maggioritarie) nella zona p si somma alla corrente di diffusione degli elettroni (cariche minoritarie) dando luogo alla corrente totale I_D nel diodo. Le lacune che arrivano al bordo della RCS ($x = -x_p$) attraversano la regione di carica spaziale senza ricombinarsi (vedi ipotesi di partenza) e vengono iniettate nella zona n, dando luogo alla corrente di diffusione di lacune $I_{pn}^{diff}(x)$. Un ragionamento duale può essere fatto per gli elettroni nella zona n. Risulta evidente dalla figura 2, che la corrente totale I_D può essere calcolata come somma delle correnti di diffusione dei minoritari (5) calcolate alla giunzione, cioè:

$$I_D = I_{pn}^{diff}(x_n) + I_{np}^{diff}(-x_p) = Aq \left(D_p \frac{p_{n0}}{L_p} + D_n \frac{n_{p0}}{L_n} \right) \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) = I_S \left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1 \right) \quad (6)$$

La corrente I_S è detta *corrente di saturazione inversa* del diodo, e la sua espressione è la seguente:

$$I_S = Aq \left(D_p \frac{p_{n0}}{L_p} + D_n \frac{n_{p0}}{L_n} \right) = Aqn_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) \quad (7)$$

Come si può osservare, tale corrente è proporzionale al quadrato della concentrazione intrinseca, ed è quindi fortemente dipendente dalla temperatura.

Nel caso di una giunzione pn sbilanciata, nella (6) domina una delle componenti di diffusione, per esempio se $N_A > N_D$, caso considerato nelle Figure 1 e 2, la $I_{pn}^{diff}(x_n) > I_{np}^{diff}(-x_p)$, cioè la corrente alla giunzione è dominata dal movimento dei portatori relativi alla regione maggiormente drogata.

Polarizzazione inversa.

Nel caso di polarizzazione inversa della giunzione p-n la tensione V_D negativa tra anodo e catodo produce un aumento della barriera di potenziale alla giunzione, che impedisce qualsiasi attraversamento della regione di svuotamento da parte di cariche maggioritarie. Il procedimento seguito per la derivazione della corrente nel diodo (6) fatta nel caso di polarizzazione diretta, rimane valido anche in condizioni di polarizzazione inversa. Pertanto, per $V_D \ll -V_T$, dalla (6) si ottiene:

$$I_D \approx -I_S \quad (8)$$

In caso di polarizzazione inversa, la legge della giunzione (3), predice una concentrazioni di minoritari alla giunzione che tende rapidamente a zero, cosicché il profilo di concentrazione di minoritari risulta simile a quanto mostrato in figura 3. Ulteriori aumenti della tensione di polarizzazione inversa produce un allargamento della RCS senza modificare il profilo di concentrazione dei minoritari giustificando in tal modo la saturazione al valore $-I_S$ della corrente nel diodo. Si osservi la notevole differenza nei due casi: in polarizzazione diretta si iniettano portatori da una regione in cui sono maggioritari (e che quindi sono presenti in grande concentrazione) in una regione dove sono minoritari, viceversa, nella polarizzazione inversa si iniettano portatori da una regione in cui sono minoritari (e che quindi sono in piccola concentrazione) in una regione dove sono maggioritari.

Diodo: $V_D < 0$

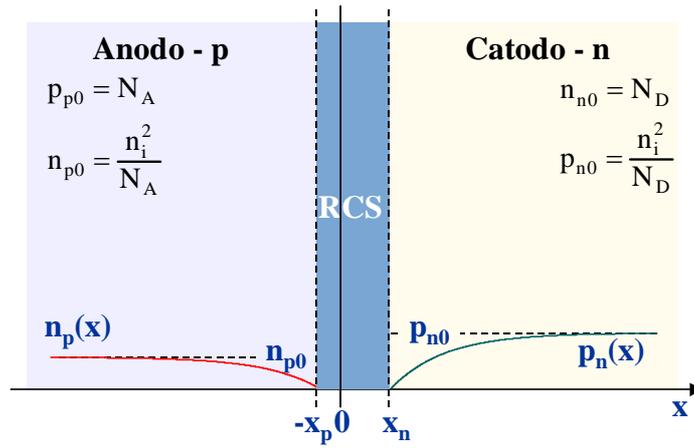


Figura 3