

Polarizzazione diretta → Passaggio di corrente

Comportamento ~ resistivo ( $R$  piccola) + effetti capacitivi ( $C$  ~ grande)

Polarizzazione inversa → No passaggio di corrente

Comportamento ~ capacitivo ( $C$  ~ piccola) + effetti resistivi ( $R$  grande)

Breakdown per tensione inversa elevata: 2 diversi meccanismi

1) Tensione di Zener

Quando la tensione inversa raggiunge un certo valore, il c. elettrico

e' sufficientemente elevato da staccare elettroni (b. valenza → b. conduzione)

→ Aumento repentino di corrente

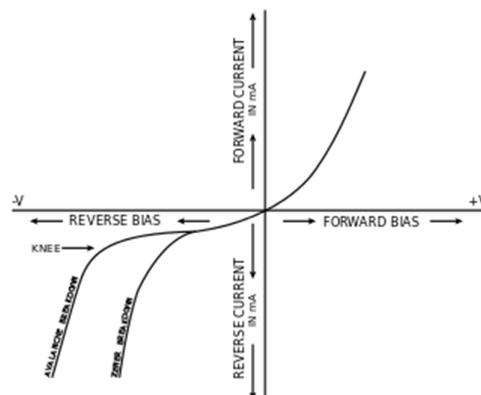
2) Moltiplicazione a valanga

Quando la tensione inversa raggiunge un certo valore, il c. elettrico

e' sufficientemente elevato da accelerare un portatore fra due collisioni

successive a un'energia tale produrre una coppia  $e - h$  per urto

→ Effetto a cascata



Richiamo: Concentrazioni & Potenziali all'equilibrio

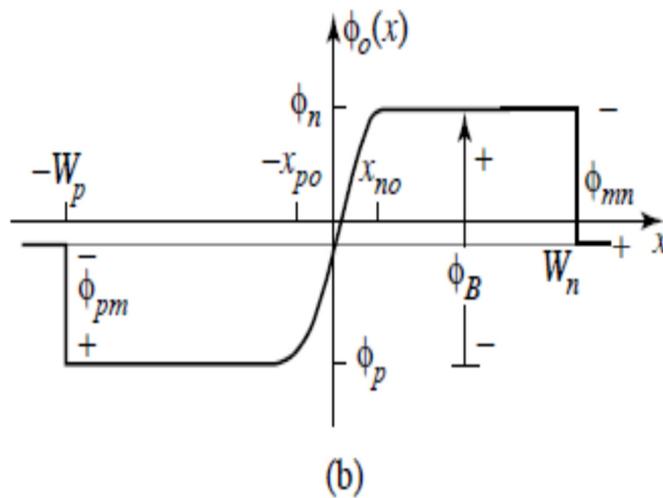
$$\rightarrow \begin{cases} n_0(x) = n_i e^{\frac{V_0(x)}{V_T}} \\ p_0(x) = p_i e^{-\frac{V_0(x)}{V_T}} \end{cases}$$

→ Il potenziale di una regione dipende dalla concentrazione

$$\rightarrow V_0(x) = V_T \ln \frac{n_0(x)}{n_i} = 26mV \ln(10) \log \frac{n_0(x)}{10^{10}} \approx 60mV \log \frac{n_0(x)}{10^{10}} \quad \text{positivo lato } n$$

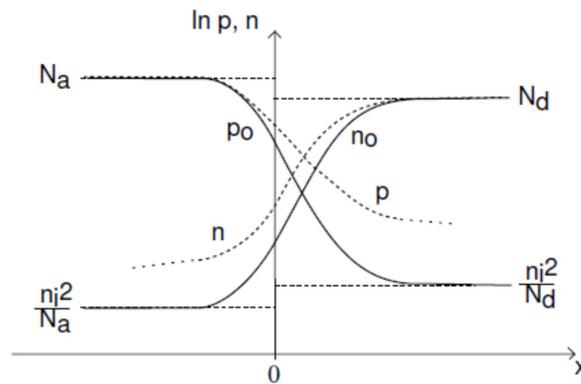
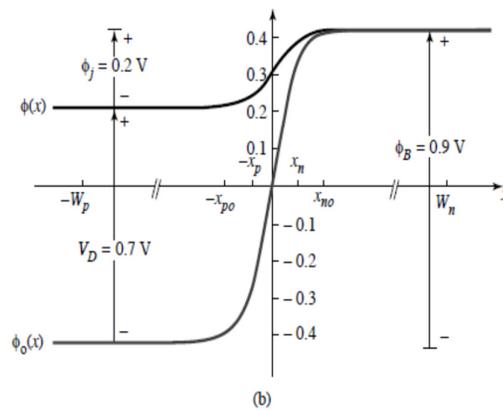
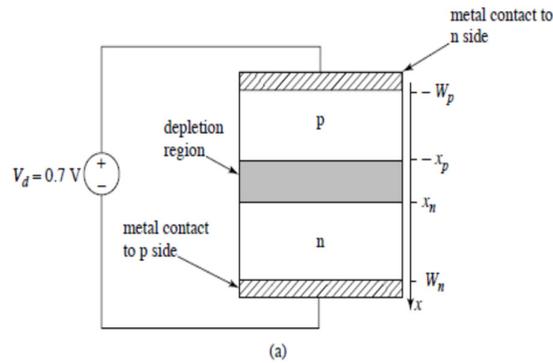
$$\rightarrow V_0(x) \approx -60mV \log \frac{p_0(x)}{10^{10}} \quad \text{negativo lato } p$$

$$\rightarrow V_{bi} = 60mV \left[ \log \frac{n_0(x)}{10^{10}} + \log \frac{p_0(x)}{10^{10}} \right] \equiv \phi_B$$



Polarizzazione diretta: abbassamento barriera di potenziale

→ Crescita (esponenziale in  $V$ ) delle concentrazioni di *minoritari*



Flusso di minoritari dai confini dello strato di svuotamento verso le regioni profonde  $n$  e  $p$

Ricombinazione con maggioritari lungo il percorso

→ Affievolimento delle correnti di minoritari verso i contatti

Flusso di maggioritari dai contatti verso lo strato di svuotamento

Ricombinazione con minoritari lungo il percorso

→ Affievolimento delle correnti di maggioritari verso lo strato di svuotamento

→ Somma dei due contributi costante lungo  $x$  :

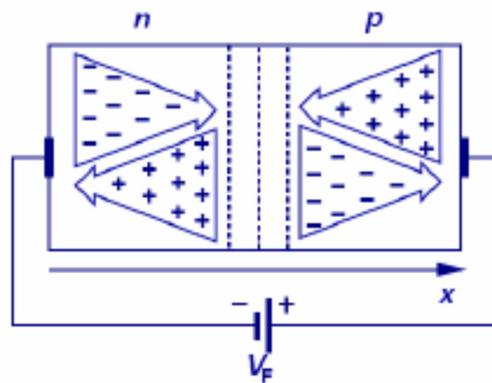
Necessario per mantenere la neutralita' delle zone esterne

Maggioritari da contatti verso lo strato di svuotamento

Minoritari da strato di svuotamento verso contatti

Corrente diretta:

Corrente di diffusione → Esponenziale nell'altezza della barriera



Variazione delle concentrazioni di minoritari:

$$p_{n,e} = \frac{P_{p,e}}{e^{\frac{V_{bi}}{V_T}}} \approx \frac{N_A}{e^{\frac{V_{bi}}{V_T}}} \rightarrow p_{n,f} = \frac{P_{p,e}}{e^{\frac{V_{bi}-V_F}{V_T}}} \approx \frac{N_A}{e^{\frac{V_{bi}-V_F}{V_T}}} = \frac{N_A}{e^{\frac{V_{bi}}{V_T}}} e^{\frac{V_F}{V_T}} = p_{n,e} e^{\frac{V_F}{V_T}}$$

$$\rightarrow \Delta p_n \approx \frac{N_A}{e^{\frac{V_{bi}}{V_T}}} \left( e^{\frac{V_F}{V_T}} - 1 \right) \text{ Incremento}$$

$$n_{p,e} = \frac{n_{n,e}}{e^{\frac{V_{bi}}{V_T}}} \approx \frac{N_D}{e^{\frac{V_{bi}}{V_T}}} \rightarrow n_{p,f} = \frac{n_{n,e}}{e^{\frac{V_{bi}-V_F}{V_T}}} = n_{p,e} e^{\frac{V_F}{V_T}}$$

$$\rightarrow \Delta n_p \approx \frac{N_D}{e^{\frac{V_{bi}}{V_T}}} \left( e^{\frac{V_F}{V_T}} - 1 \right) \text{ Incremento}$$

$$\rightarrow I \propto \Delta p_n + \Delta n_p = \frac{N_A}{e^{\frac{V_{bi}}{V_T}}} \left( e^{\frac{V_F}{V_T}} - 1 \right) + \frac{N_D}{e^{\frac{V_{bi}}{V_T}}} \left( e^{\frac{V_F}{V_T}} - 1 \right)$$

Da espressione per densita' di corrente totale:

$$\begin{cases} j_n = q\Delta n\mu_n E + qD_n \frac{d\Delta n}{dx} \\ j_p = q\Delta p\mu_p E - qD_p \frac{d\Delta p}{dx} \end{cases}$$

si puo' dimostrare che:

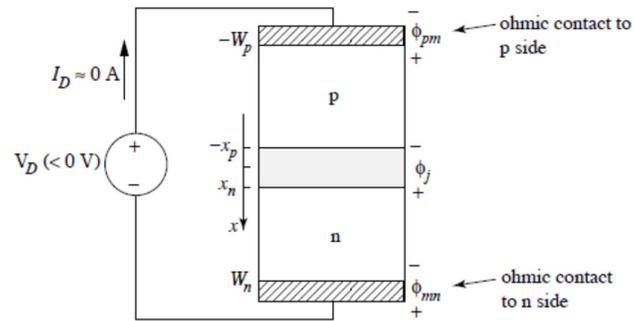
$$j = qn_i^2 \left( \frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p} \right) \left( e^{\frac{V_F}{V_T}} - 1 \right), \quad L_{n,p} \text{ lunghezze di diffusione}$$

$$\rightarrow I = I_S \left( e^{\frac{V_F}{V_T}} - 1 \right) \quad \text{eq. del diodo (Shockley)}$$

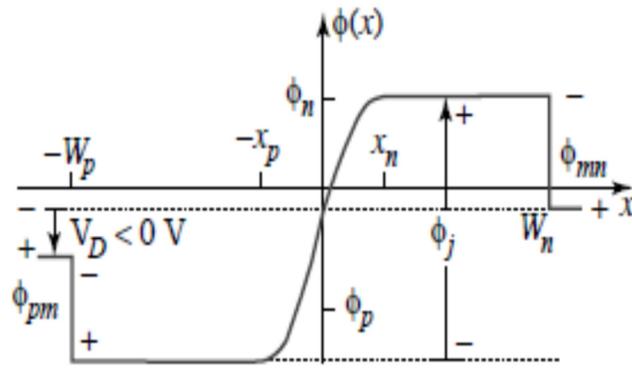
$$I_S = Aqn_i^2 \left( \frac{D_n}{N_A L_n} + \frac{D_p}{N_D L_p} \right)$$

Polarizzazione inversa:

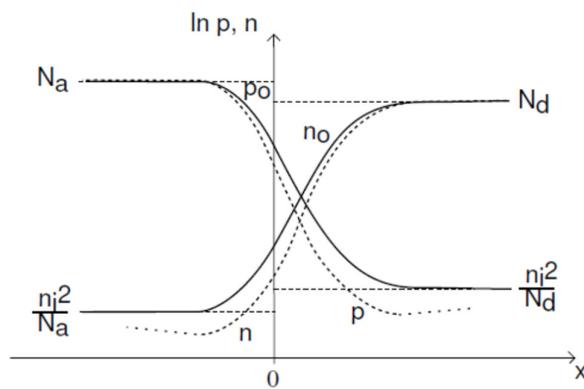
Riduzione delle concentrazioni di minoritari



(a)



(b)



Corrente inversa:

Corrente di drift legata all'attivazione termica di portatori nella giunzione

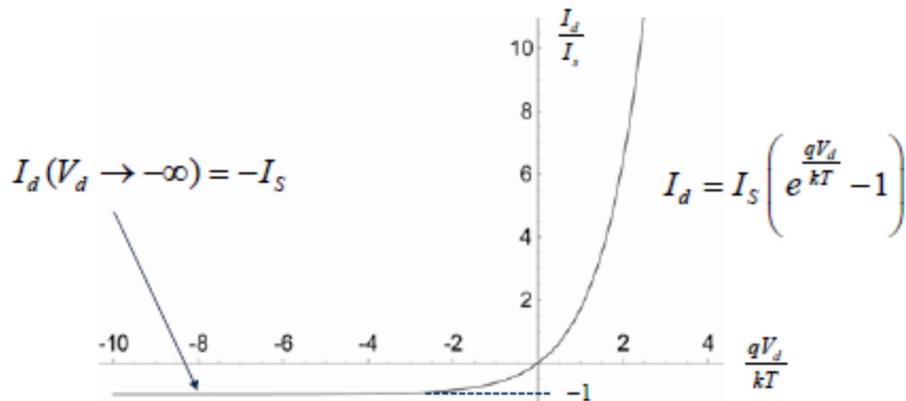
→ Indipendente da altezza barriera

$$I = -I_S$$

Minoritari da contatti verso strato di svuotamento

Maggioritari da strato di svuotamento verso contatti

Andamento complessivo caratteristica della giunzione = diodo:



Resistenza dinamica:

$$I = I_S \left( e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right), \text{ pol. diretta}$$

$$\frac{dI}{dV} = \frac{I_S}{V_T} e^{\frac{V}{V_T}} \approx \frac{I}{V_T} \equiv \frac{1}{r_D}$$

$$V_{T_{amb}} \approx 26 \text{ mV} \rightarrow r_D \approx \frac{26}{I(\text{mA})} \Omega$$

Res. dinamica  $\neq$  Res. equivalente del diodo:

Anche contributi ohmici da zone  $p$  e  $n$  quasi neutre

Polarizzazione diretta  $\rightarrow$  Corrente  $I$

Tempo di attraversamento della base:  $\tau_F$

$\rightarrow$  Carica immagazzinata:

$$Q = I\tau_F$$

$\rightarrow$  Capacita' equivalente:

$$C_{diff} = \frac{dQ}{dV} = \frac{dI}{dV} \tau_F = \frac{\tau_F}{r_d} = \frac{\tau_F}{V_T} I \quad \text{cap. di diffusione}$$

Polarizzazione inversa  $\rightarrow \sim$  Nessuna corrente

Larghezza strato di svuotamento:

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_{bi} - V_D)}{qN_D} \frac{N_A}{N_A + N_D}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi} \left(1 - \frac{V_D}{V_{bi}}\right)}{qN_D} \frac{N_A}{N_A + N_D}}$$

$$\rightarrow x_n = x_{n0} \sqrt{1 - \frac{V_D}{V_{bi}}}$$

$$\rightarrow x_p = x_{p0} \sqrt{1 - \frac{V_D}{V_{bi}}}$$

$$\rightarrow X = (x_n + x_p) = X_0 \sqrt{1 - \frac{V_D}{V_{bi}}} \text{ larghezza strato di svuotamento}$$

$$Q = -qN_A x_p A = -qN_A A x_{p0} \sqrt{1 - \frac{V_D}{V_{bi}}} \text{ carica -va in strato di svuotamento}$$

$$C = \frac{dQ}{dV_D} = \frac{qN_A A x_{p0}}{2V_{bi} \sqrt{1 - \frac{V_D}{V_{bi}}}} = \frac{C_0}{\sqrt{1 - \frac{V_D}{V_{bi}}}} \text{ Cap. equivalente della giunzione}$$

$$C_0 = \frac{qN_A A x_{p0}}{2V_{bi}} = \frac{qN_A A}{2V_{bi}} \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{qN_A} \frac{N_D}{N_A + N_D}}$$

$$C_0 = A \sqrt{\frac{q\varepsilon}{2V_{bi}} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}} \text{ Capacita' di transizione}$$

Riassunto effetto di un bias esterno:

