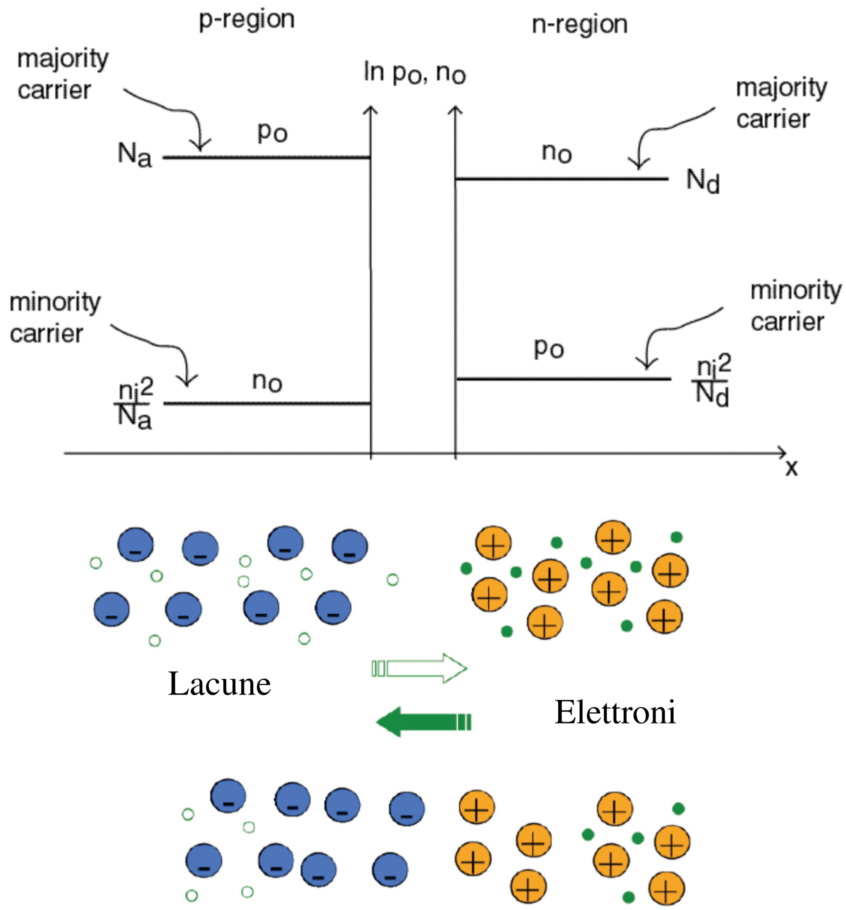
Giunzione pn :

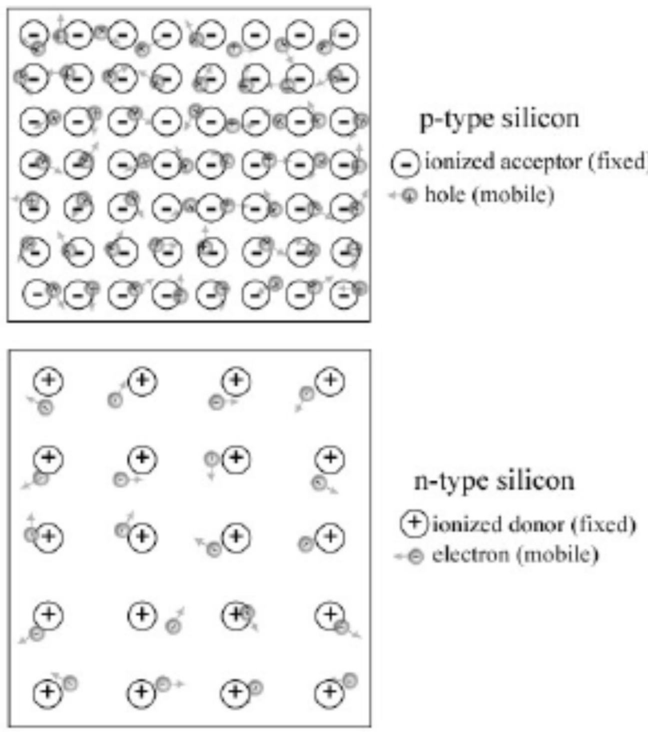


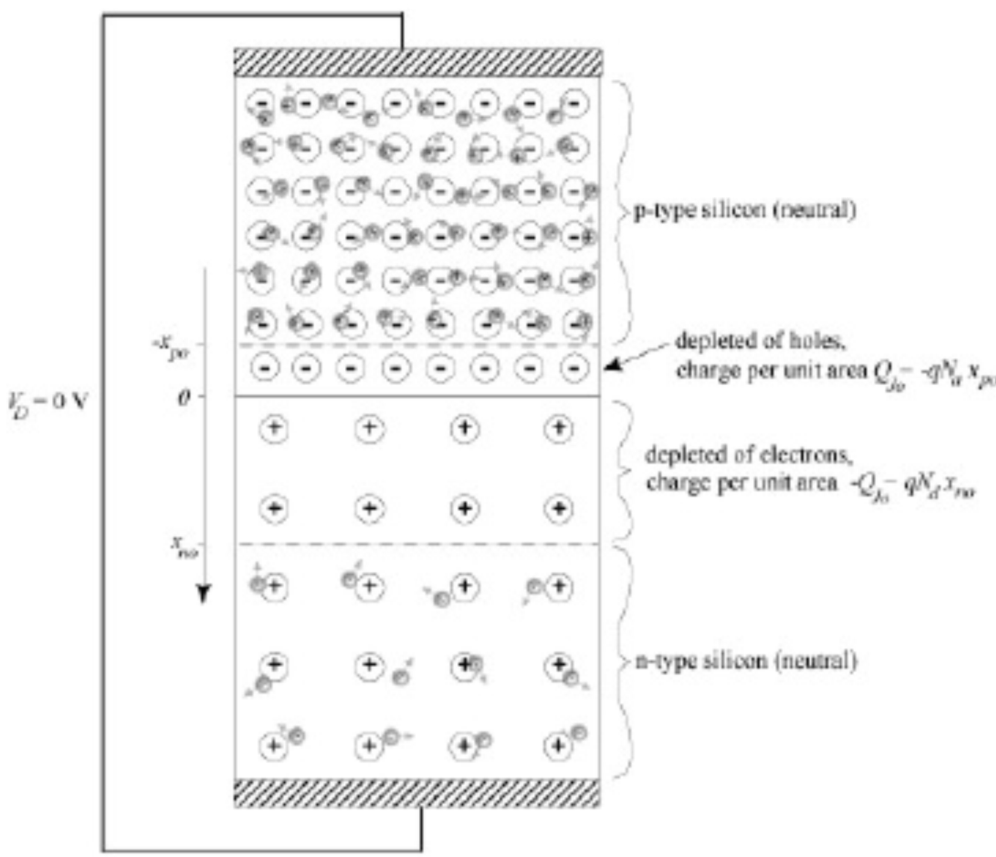
Giunzione 'metallurgica': cucitura dei due reticoli

Di fatto, esperimento ideale: in pratica non fattibile
Altri effetti impediscono di realizzare la giunzione fra reticoli
In concreto, giunzione realizzata su unico substrato

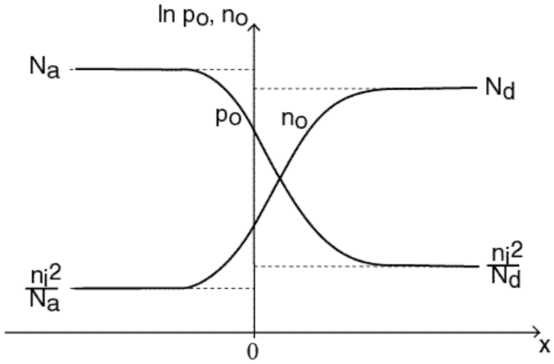
Flusso transitorio di elettroni e lacune da zone ad alta verso zone a bassa concentrazione
$\longrightarrow$ Formazione di 'carica spaziale': cariche ioni donori e accettori (fisse)
localmente non compensate
$\longrightarrow$ Formazione di un campo elettrico (direzione da n a p) che ostacola
ulteriore flusso di e, h
$\longrightarrow$ Equilibrio

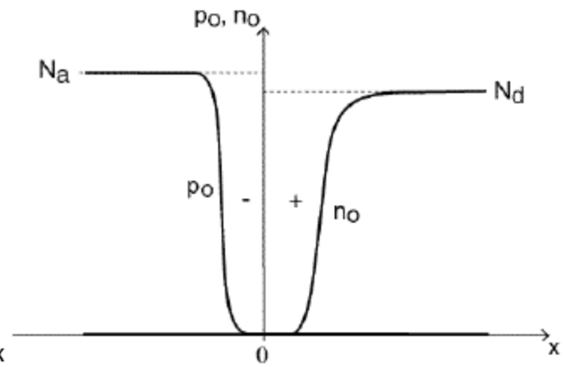
Formazione dello strato di svuotamento:



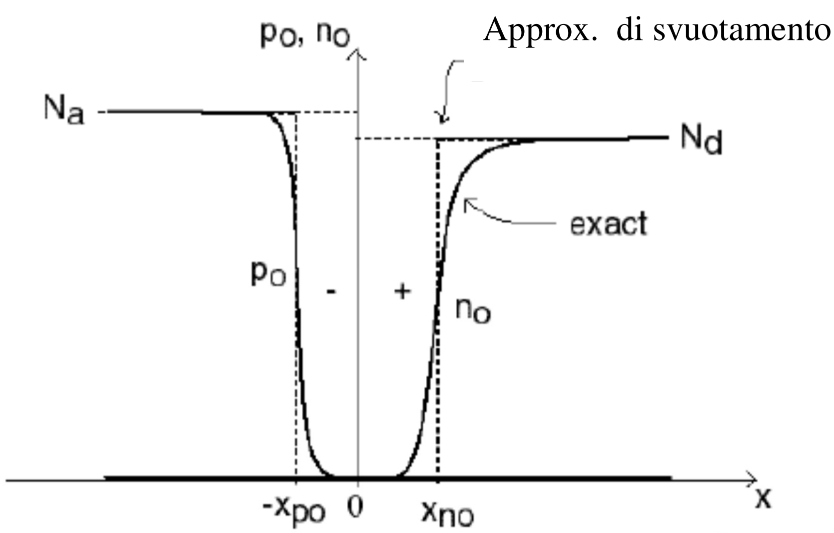


Concentrazioni:





Approssimazione di svuotamento:



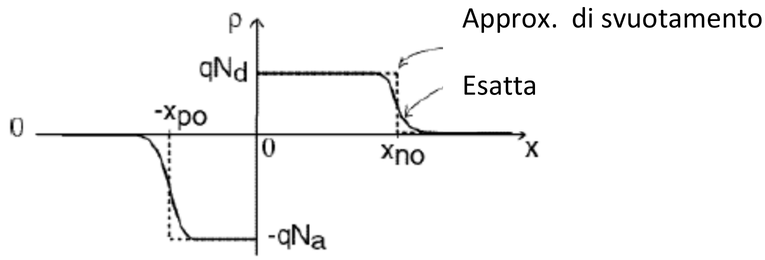
$$x < -x_{p0}: \qquad p_0(x) = N_A, n_0(x) = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$-x_{p0} < x < 0: \quad p_0(x), n_0(x) \ll N_A$$

$$0 < x < +x_{n0}: \quad n_0(x), p_0(x) \ll N_D$$

$$x > +x_{n0}: \qquad n_0(x) = N_D, p_0(x) = \frac{n_i^2}{N_D}$$

Densita' di carica elettrica:



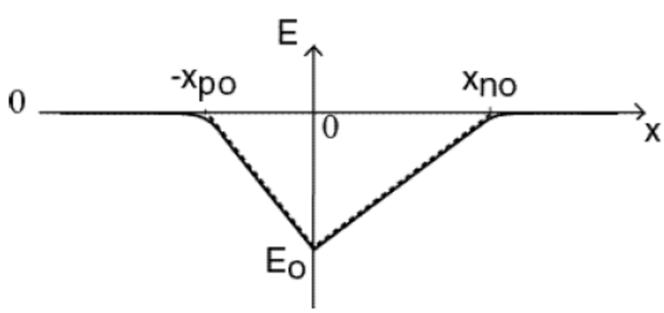
$$x < -x_{p0}: \qquad \rho(x) = 0$$
$$-x_{p0} < x < 0: \quad \rho(x) = -qN_A$$
$$0 < x < +x_{n0}: \quad \rho(x) = qN_D$$
$$x > +x_{n0}: \qquad \rho(x) = 0$$

Campo elettrico: Eq. di Poisson

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \rightarrow \frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad \text{1D}$$

$$E(x_2) - E(x_1) = \frac{1}{\varepsilon} \int_{x_1}^{x_2} \rho(x)\, dx$$

$$x < -x_{p0}: \qquad E(x) = 0$$
$$-x_{p0} < x < 0: \quad E(x) - E(-x_{p0}) = -\frac{qN_A}{\varepsilon_s} x\Big|_{-x_{p0}}^{x} = -\frac{qN_A}{\varepsilon_s}(x + x_{p0})$$
$$0 < x < +x_{n0}: \quad E(x) = \frac{qN_D}{\varepsilon_s}(x - x_{n0})$$
$$x > +x_{n0}: \qquad E(x) = 0$$



Potenziale elettrostatico:

$$V(x) = -\int_{x_0}^{x} E(x')\,dx'$$

$$x < -x_{p0}: \qquad E(x) = 0$$

$$\rightarrow V(x) = V_0 = V(-x_{p0}) \equiv 0$$

$$-x_{p0} < x < 0: \quad E(x) = -\frac{qN_A}{\varepsilon_s}(x + x_{p0})$$

$$\rightarrow V(x) = -\int_{-x_{p0}}^{x} \left[-\frac{qN_A}{\varepsilon_s}(x' + x_{p0})\right] dx' = \frac{qN_A}{2\varepsilon_s}\left[(x + x_{p0})^2 - (-x_{p0} + x_{p0})^2\right] = \frac{qN_A}{2\varepsilon_s}(x + x_{p0})^2$$

$$\rightarrow V(0) = \frac{qN_A}{2\varepsilon_s} x_{p0}^2$$

$$0 < x < +x_{n0}: \quad E(x) = \frac{qN_D}{\varepsilon_s}(x - x_{n0})$$

$$\rightarrow V(x) = -\int_{0}^{x} \left[\frac{qN_D}{\varepsilon_s}(x' - x_{n0})\right] dx' = -\frac{qN_D}{2\varepsilon_s}(x - x_{n0})^2\Big|_0^x = -\frac{qN_D}{2\varepsilon_s}\left[(x - x_{n0})^2 - (0 - x_{n0})^2\right]$$

$$\rightarrow V(x) = \frac{q}{2\varepsilon_s}\left[-N_D(x - x_{n0})^2 + N_D x_{n0}^2\right]$$

$$\rightarrow V(0) = 0,\ V(x_{n0}) = \frac{q}{\varepsilon_s} N_D \frac{{x_{n0}}^2}{2}$$

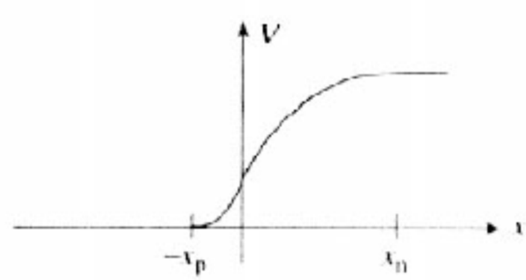
Richiedendo $V(x)$ continuo in $x = 0,$ occorre aggiungere la costante $\frac{qN_A}{2\varepsilon_s} x_{p0}^2$:

possibile perche' soluzioni in segmenti diversi sono indipendenti

$$\rightarrow V(0) = \frac{qN_A}{2\varepsilon_s} x_{p0}^2 \rightarrow V(x_{n0}) = \frac{q}{2\varepsilon_s}\left(N_D {x_{n0}}^2 + N_A x_{p0}^2\right)$$

$$x > +x_{n0}: \qquad E(x) = 0$$

$$\rightarrow V(x) = V(x_{n0}) = V(x_{n0}) - \underbrace{V(-x_{p0})}_{=0\ \text{(conv)}} = \frac{q}{2\varepsilon_s}\left[N_A x_{p0}^2 + N_D x_{n0}^2\right] \equiv V_{bi}$$



Per determinare la zona di svuotamento:

1) Potenziale built-in

$$\frac{\mu_n}{D_n}\frac{dV}{dx}=\frac{1}{n}\frac{dn}{dx}$$

$$\frac{q}{kT}\frac{dV}{dx}=\frac{1}{n}\frac{dn}{dx}=\frac{d\left(\ln n\right)}{dx}$$ Relazione di Einstein

$$\rightarrow\frac{q}{kT}\left(V-V_0\right)=\ln\frac{n}{n_0}$$

$$\rightarrow n=n_0e^{\frac{q\left(V-V_0\right)}{kT}}$$

Fissando $n=n_i$ per $V=0$:

$$n_i=n_0e^{-\frac{qV_0}{kT}}\rightarrow \text{OK con}\begin{cases}V_0=0\\ n_0=n_i\end{cases}$$

$$\rightarrow n=n_ie^{\frac{qV}{kT}}\approx N_D$$

$$\rightarrow p=p_ie^{-\frac{qV}{kT}}\approx N_A$$

$$\rightarrow\begin{cases}V_n=\dfrac{kT}{q}\ln\dfrac{N_D}{n_i}\\ V_p=-\dfrac{kT}{q}\ln\dfrac{N_A}{n_i}\end{cases}$$

$$\rightarrow V_{bi}=V_n-V_p\approx\frac{kT}{q}\left(\ln\frac{N_D}{n_i}+\ln\frac{N_A}{n_i}\right)=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_DN_A}{n_i^2}$$ Tensione di built-in

2) Larghezza dello strato di svuotamento

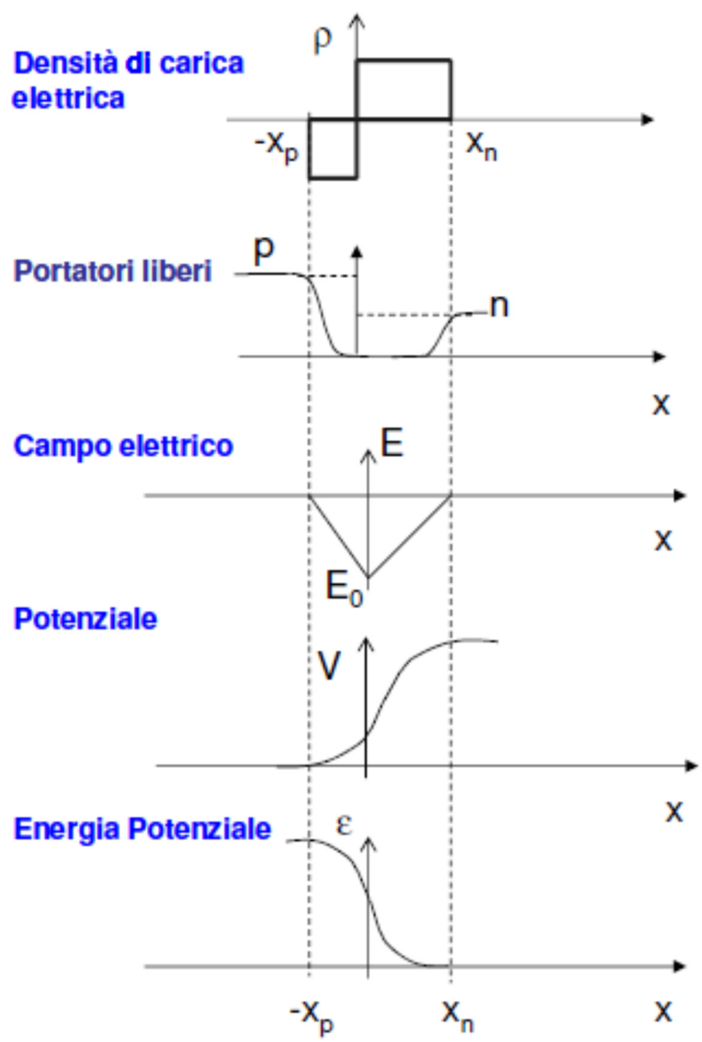
Neutralita' globale:

$$\underbrace{qN_Ax_{p0}}_{\text{carica totale lato }p}=\underbrace{qN_Dx_{n0}}_{\text{carica totale lato }n}$$

$$V_{bi}=\frac{kT}{q}\ln\frac{N_D N_A}{n_i^2}=\frac{q}{2\varepsilon_s}\left[N_A x_{p0}^2+N_D x_{n0}^2\right],\quad \text{cfr. prima}$$

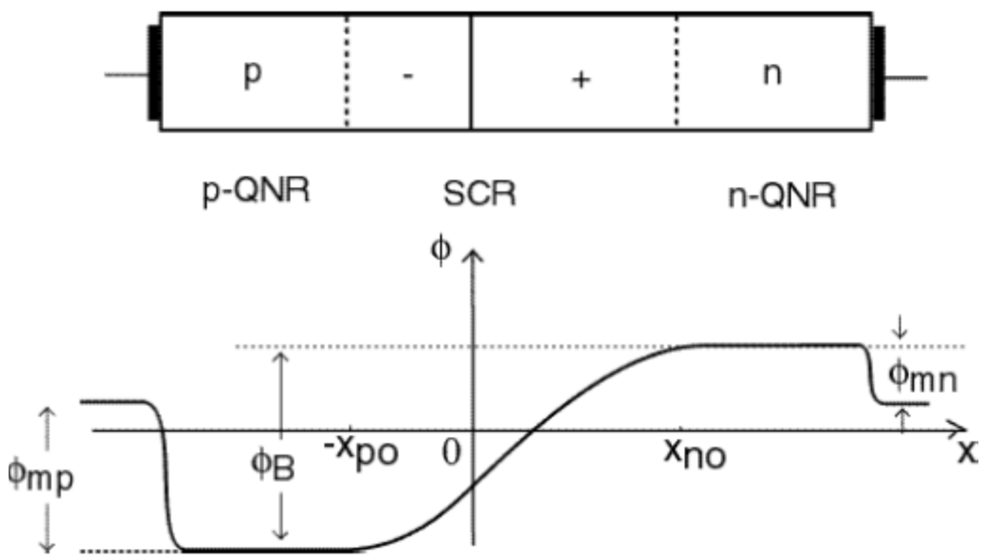
$$\rightarrow \left.\begin{array}{l} x_{n0}=\sqrt{\dfrac{2\varepsilon_s V_{bi} N_A}{q\left(N_A+N_D\right)N_D}} \\ x_{p0}=\sqrt{\dfrac{2\varepsilon_s V_{bi} N_D}{q\left(N_A+N_D\right)N_A}} \end{array}\right\}$$

$$\rightarrow x_{n0}+x_{p0}=\sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_{bi}\left(N_A+N_D\right)}{qN_D N_A}}$$



Trovato il modo di generare f.e.m/corrente elettrica gratis?

Stiamo violando un paio di principi della termodinamica?

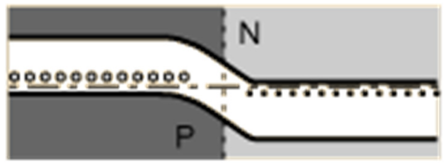


Giunzioni metallo-semiconduttore per contatti alle estremita':

$$\begin{cases} \text{non si puo' misurare } V_{bi} \\ \text{non passa corrente in un circuito esterno} \end{cases}$$

Equilibrio:

La barriera di potenziale $\left(\leftarrow \text{Campo elettrico dovuto alla carica spaziale}\right)$ e' quella di built-in

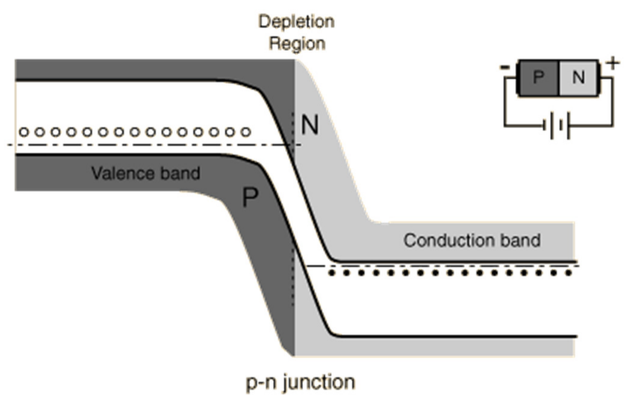


Situazione diversa con polarizzazione esterna

Polarizzazione inversa:

Situazione simile, con barriera piu' alta

$V = V_{bi} + V_{ext}$



Polarizzazione diretta:

Situazione simile, con barriera piu' bassa

$V = V_{bi} - V_{ext}$