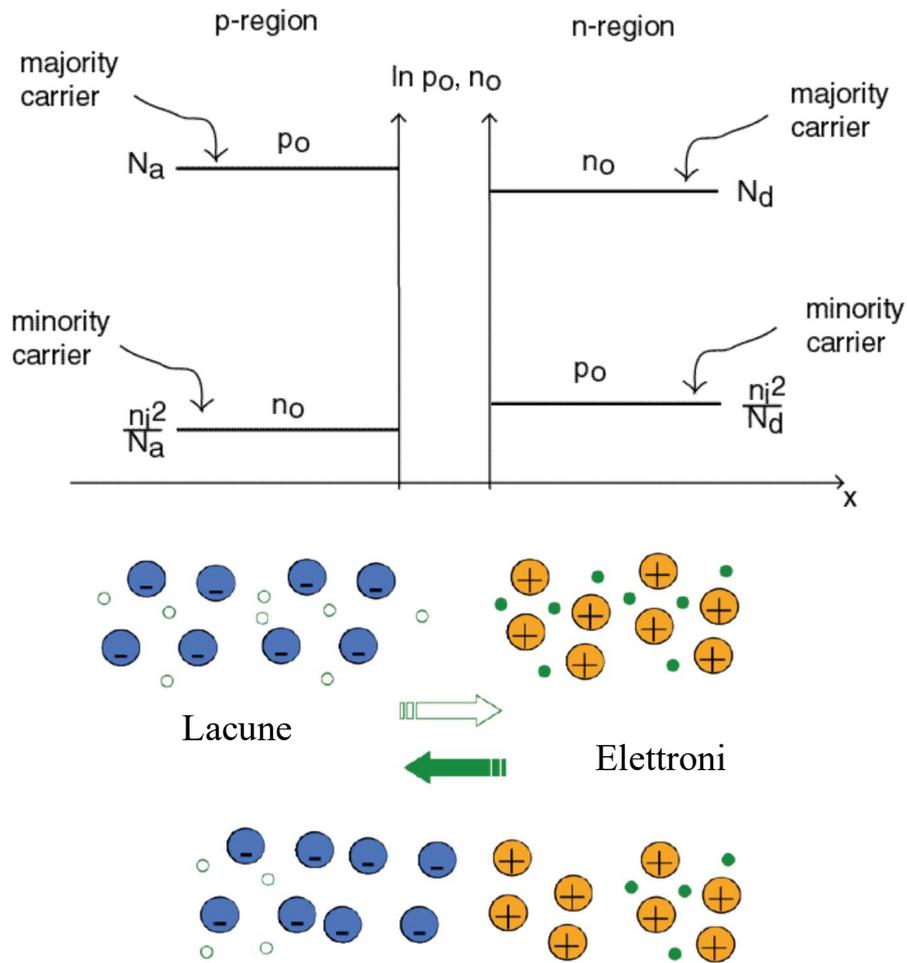


## 12 - Giunzione *pn*



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

→ Formazione di 'carica spaziale': cariche ioni donori e accettori (fisse)

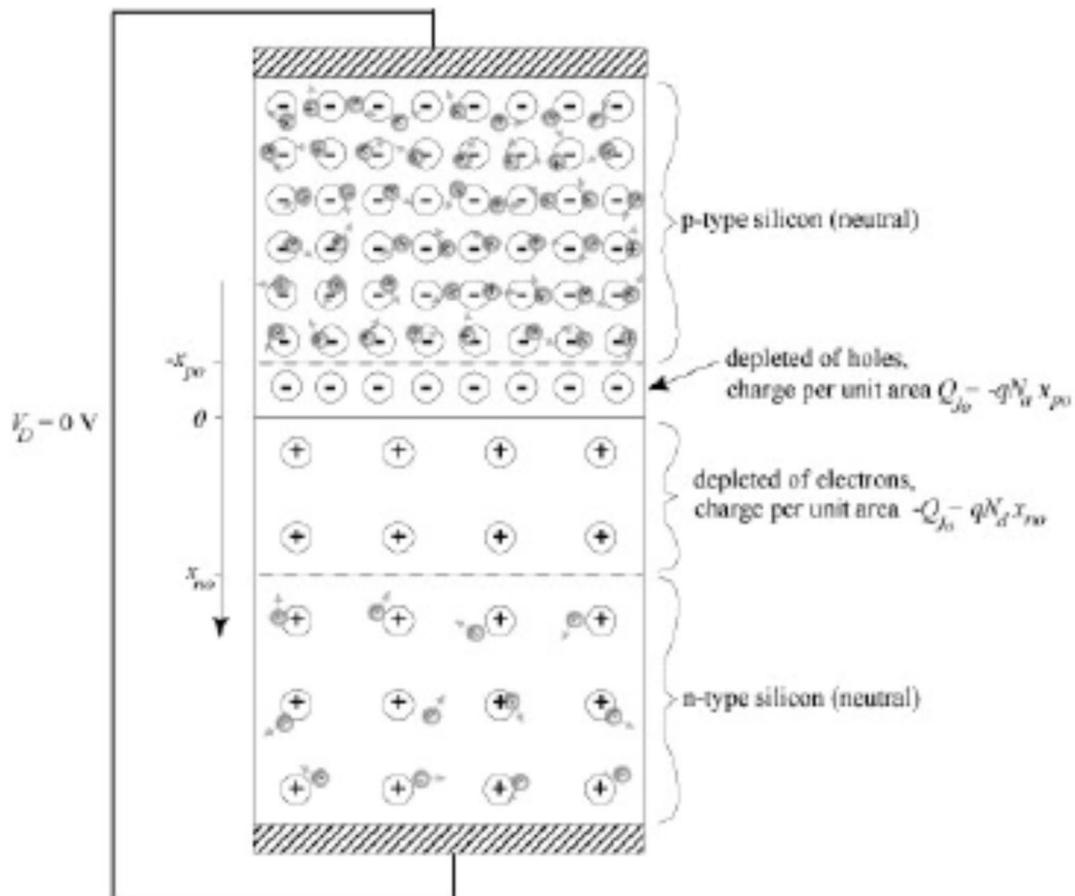
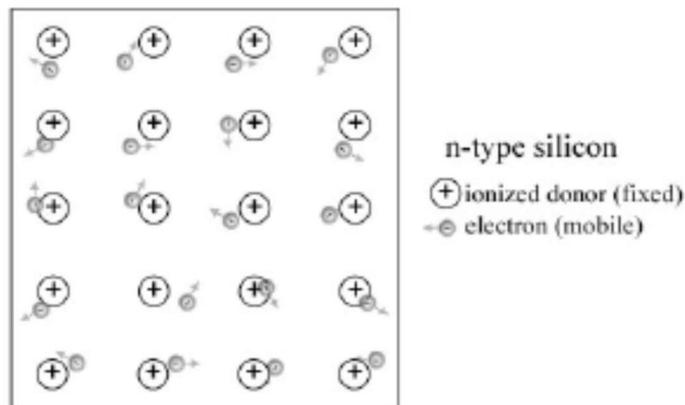
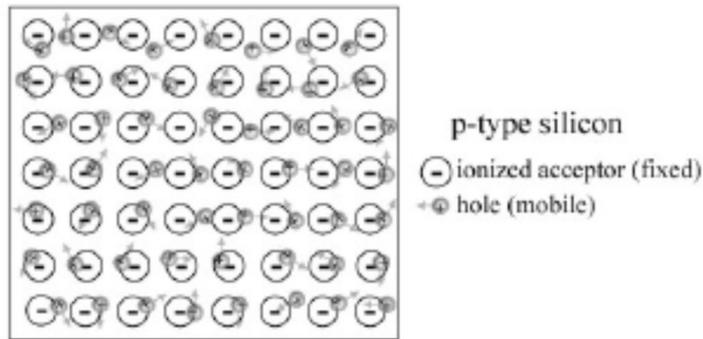
localmente non compensate

→ Formazione di un campo elettrico (direzione da n a p) che ostacola

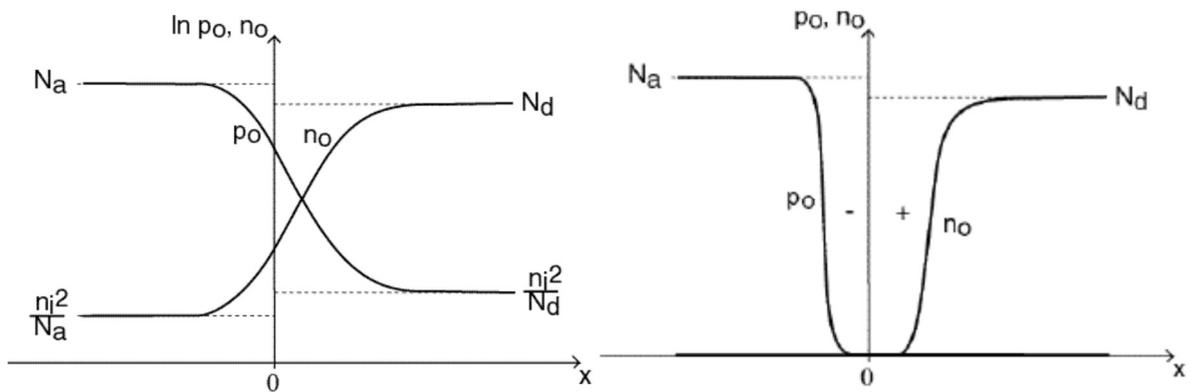
ulteriore flusso di  $e, h$

→ Equilibrio

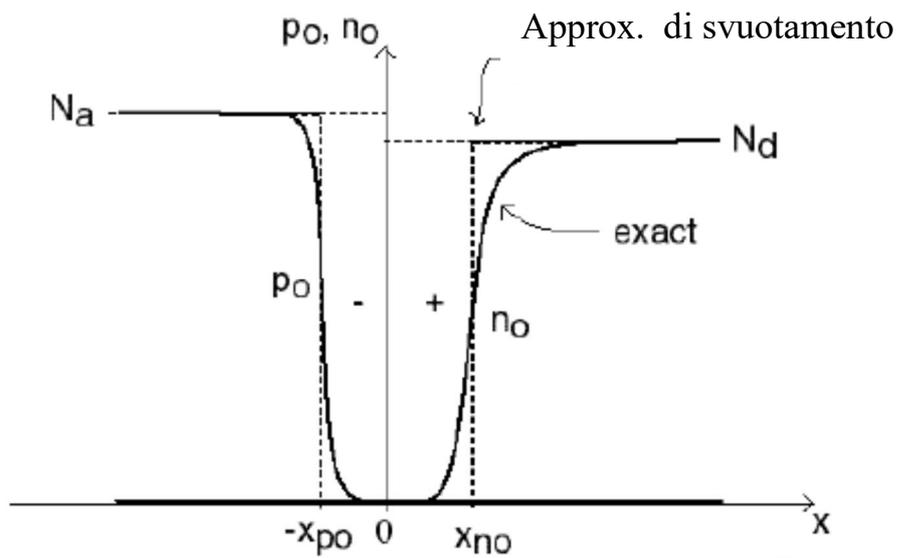
Formazione dello strato di svuotamento:



Concentrazioni:



Approssimazione di svuotamento:



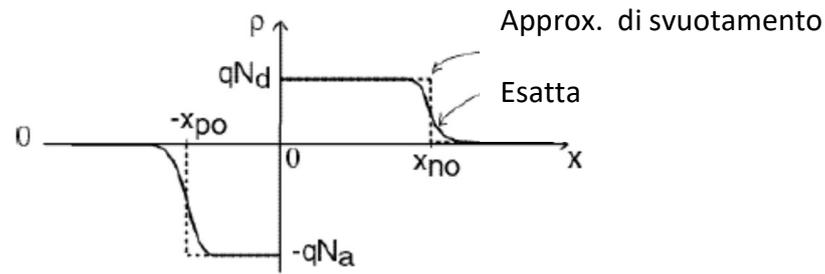
$$x < -x_{p0} : \quad p_0(x) = N_A, n_0(x) = \frac{n_i^2}{N_A}$$

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

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

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

Densita' di carica elettrica:



$$x < -x_{p0} : \quad \rho(x) = 0$$

$$-x_{p0} < x < 0 : \quad \rho(x) = -qN_A$$

$$0 < x < +x_{n0} : \quad \rho(x) = qN_D$$

$$x > +x_{n0} : \quad \rho(x) = 0$$

Campo elettrico: Eq. di Poisson

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \rightarrow \frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \quad 1D$$

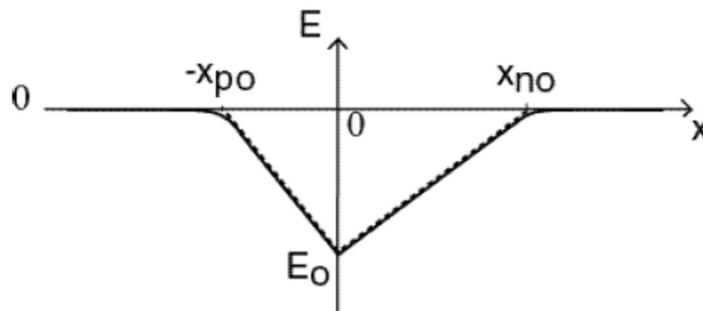
$$E(x_2) - E(x_1) = \frac{1}{\epsilon} \int_{x_1}^{x_2} \rho(x) dx$$

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

$$-x_{p0} < x < 0 : \quad E(x) - E(-x_{p0}) = -\frac{qN_A}{\epsilon_s} x \Big|_{-x_{p0}}^x = -\frac{qN_A}{\epsilon_s} (x + x_{p0})$$

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

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



Potenziale elettrostatico:

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

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

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

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

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

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

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

$$\rightarrow V(x) = - \int_0^x \left[ \frac{qN_D}{\epsilon_s}(x' - x_{n0}) \right] dx' = -\frac{qN_D}{2\epsilon_s} (x - x_{n0})^2 \Big|_0^x = -\frac{qN_D}{2\epsilon_s} \left[ (x - x_{n0})^2 - (0 - x_{n0})^2 \right]$$

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

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

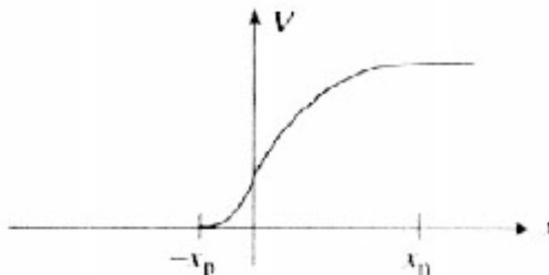
Richiedendo  $V(x)$  continuo in  $x = 0$ , occorre aggiungere la costante  $\frac{qN_A}{2\epsilon_s} x_{p0}^2$  :

possibile perche' soluzioni in segmenti diversi sono indipendenti

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

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

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



Per determinare la zona di svuotamento:

### 1) Potenziale built-in

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

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

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

$$\rightarrow n = n_0 e^{\frac{q(V-V_0)}{kT}}$$

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

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

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

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

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

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

### 2) Larghezza dello strato di svuotamento

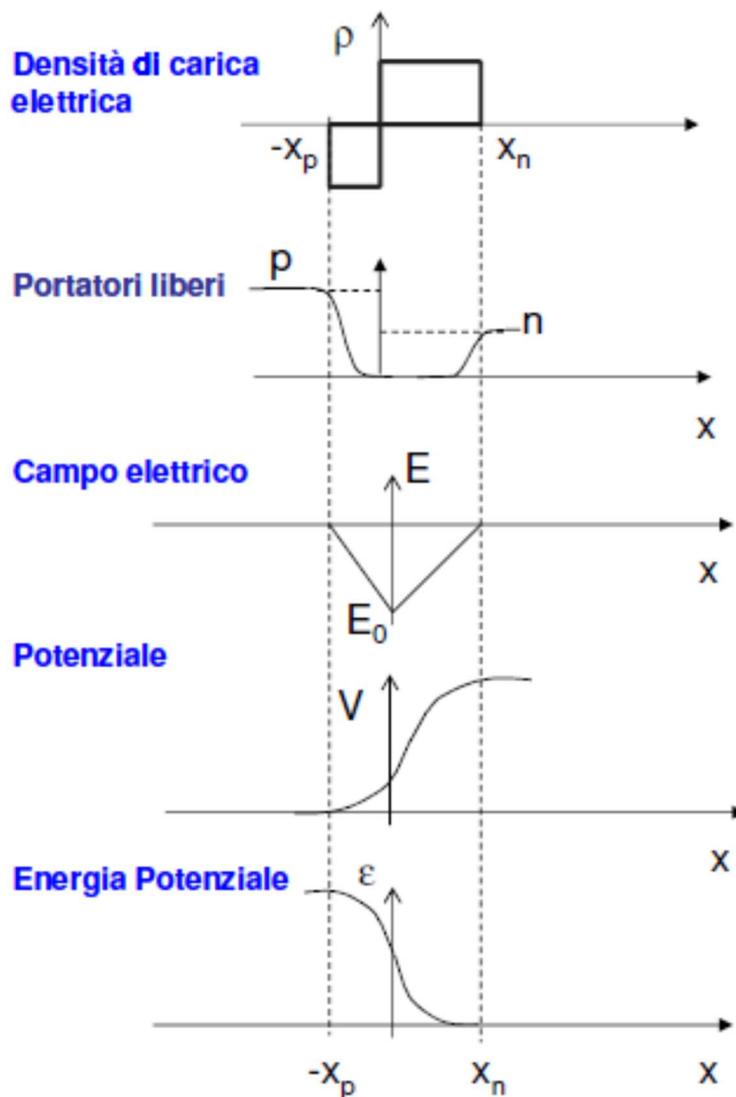
Neutralità globale:

$$\underbrace{qN_A x_{p0}}_{\text{carica totale lato } p} = \underbrace{qN_D x_{n0}}_{\text{carica totale lato } n}$$

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

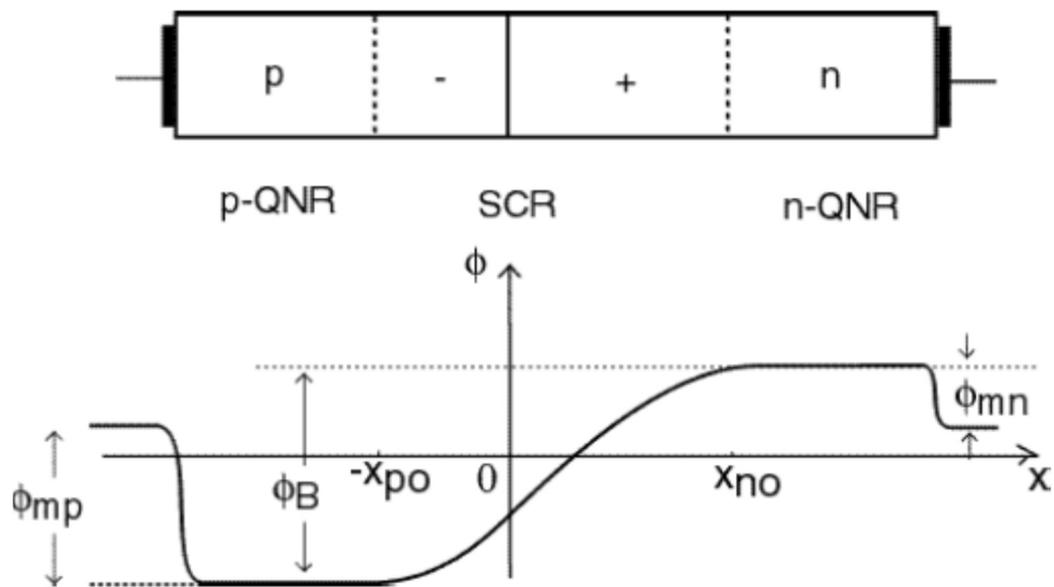
$$\rightarrow \left. \begin{aligned} x_{n0} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi} N_A}{q(N_A + N_D) N_D}} \\ x_{p0} &= \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi} N_D}{q(N_A + N_D) N_A}} \end{aligned} \right\}$$

$$\rightarrow x_{n0} + x_{p0} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi} (N_A + N_D)}{q N_D N_A}}$$



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

Stiamo violando un paio di principi della termodinamica?

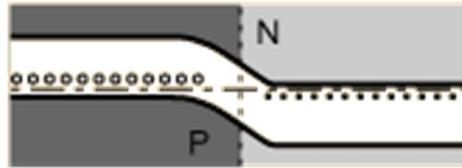


Giunzioni metallo-semiconduttore per contatti alle estremita':

{ non si puo' misurare  $V_{bi}$   
{ non passa corrente in un circuito esterno

Equilibrio:

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

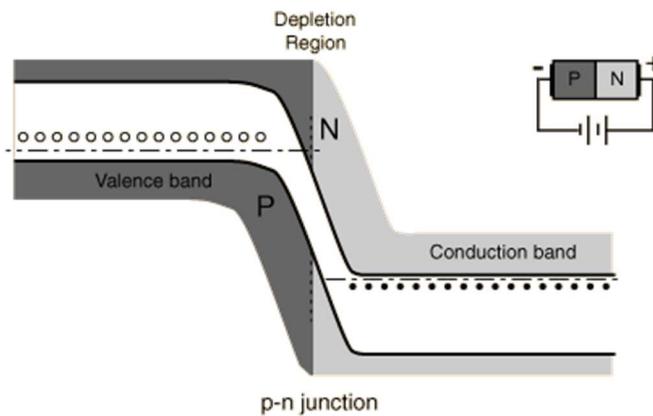


Situazione diversa con polarizzazione esterna

Polarizzazione inversa:

Situazione simile, con barriera piu' alta

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



Polarizzazione diretta:

Situazione simile, con barriera piu' bassa

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

