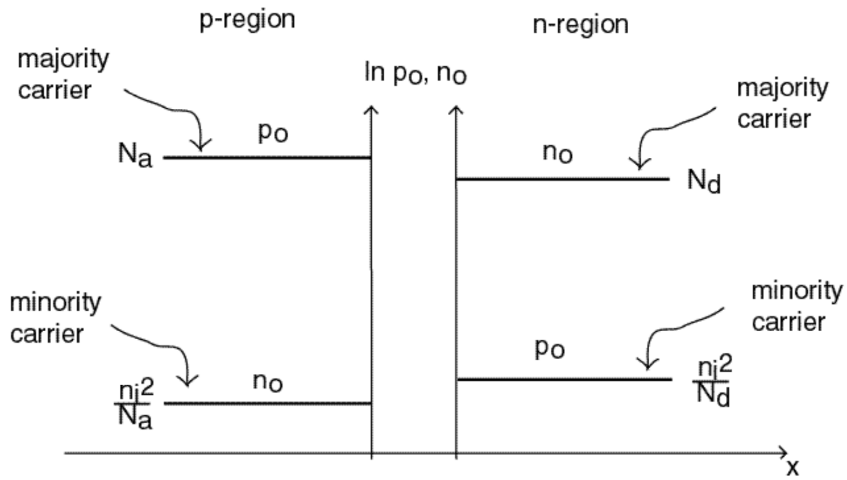
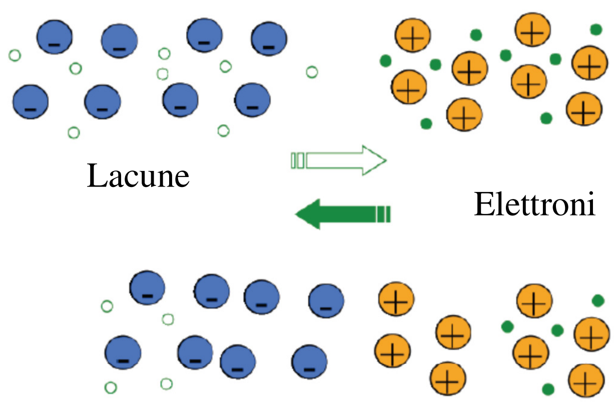
Giunzione $pn$ :



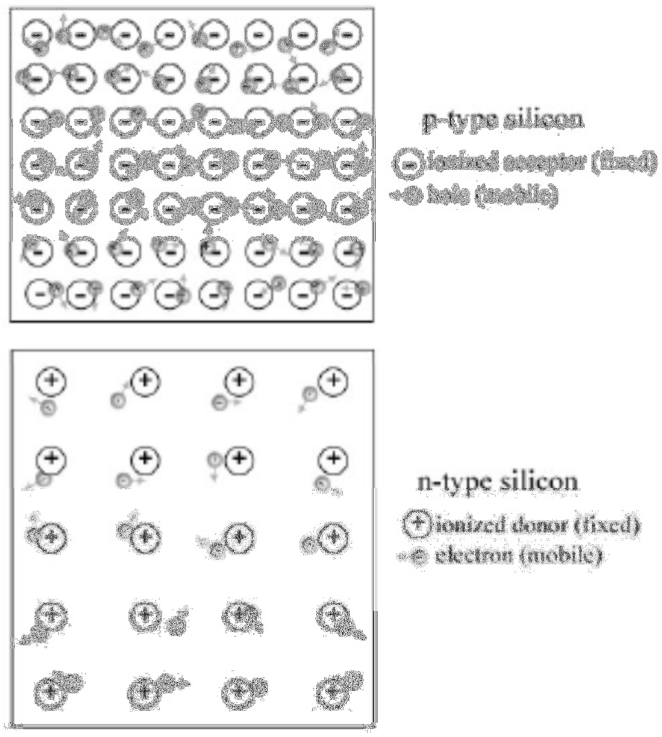



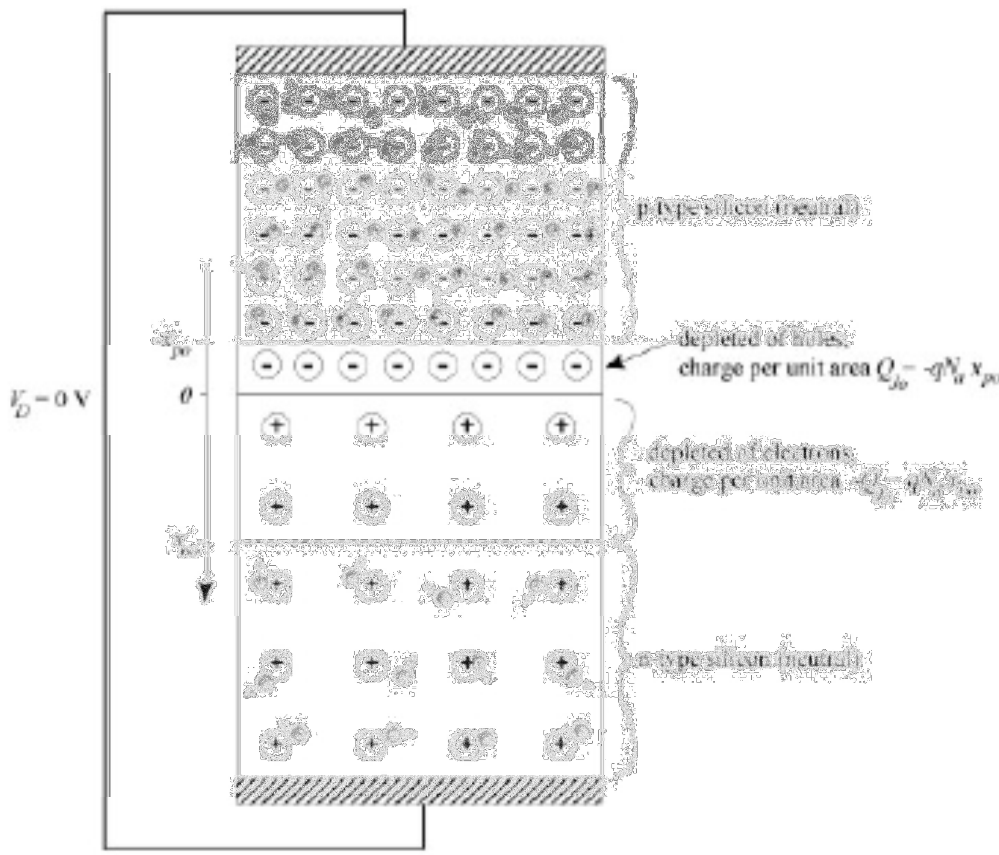

Giunzione 'metallurgica': cucitura dei due reticoli

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

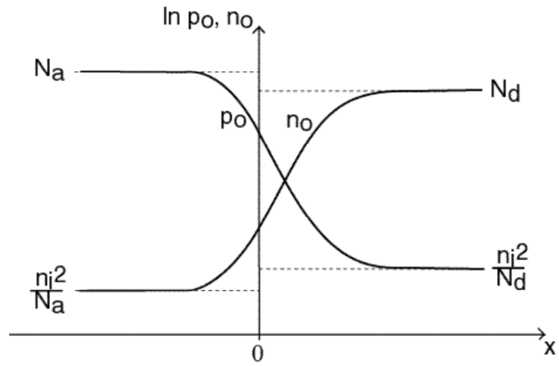
Flusso transitorio di elettroni e lacune da zone ad alta verso zone a bassa concentrazione
$\rightarrow$ Formazione di 'carica spaziale': cariche ioni donori e accettori (fisse) localmente non compensate
$\rightarrow$ Formazione di un campo elettrico (direzione da n a p) che ostacola ulteriore flusso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

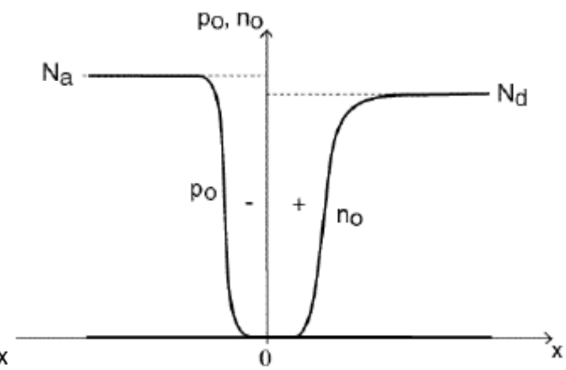
Formazione dello strato di svuotamento:



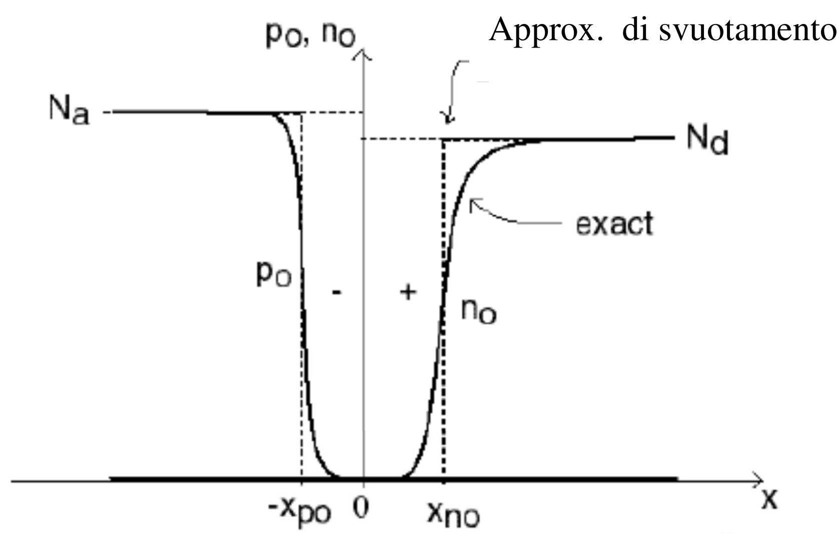



Concentrazioni:




Approssimazione di svuotamento:



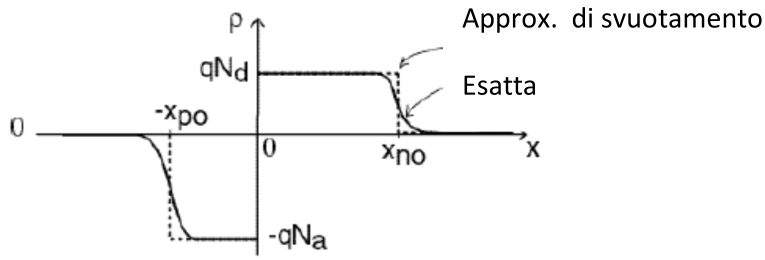

$$x < -x_{p0}: \qquad p_0(x) = N_A, n_0(x) = \frac{n_i^2}{N_A}$$

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

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

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

Densita’ di carica elettrica:



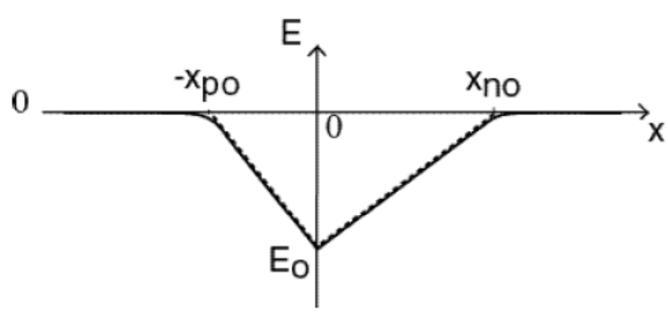

$$
\begin{aligned}
&x < -x_{p0}: && \rho(x) = 0 \\
&-x_{p0} < x < 0: && \rho(x) = -qN_A \\
&0 < x < +x_{n0}: && \rho(x) = qN_D \\
&x > +x_{n0}: && \rho(x) = 0
\end{aligned}
$$

Campo elettrico: Eq. di Poisson

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

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

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



Potenziale elettrostatico:

$$V(x)-V_0=-\int_{x_0}^{x}E(x')dx'$$

$$\rightarrow V(x)=-\int_{x_0}^{x}E(x')dx'+V_0$$

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

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

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

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

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

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

$$\rightarrow V(x)=-\int_{-x_{p0}}^{x}\left[\frac{qN_D}{\varepsilon_s}(x'-x_{n0})\right]dx'=V(0)-\frac{qN_D}{2\varepsilon_s}(x-x_{n0})^2\Big|_0^x$$

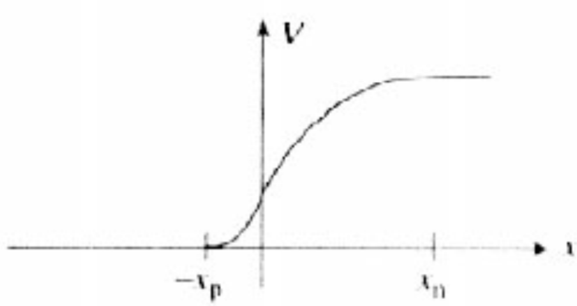
$$\rightarrow V(x)=\frac{q}{2\varepsilon_s}\left[N_A x_{p0}^2-N_D(x-x_{n0})^2+N_D x_{n0}^2\right]$$

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

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

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

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



Per determinare la zona di svuotamento:

1) Neutralita' globale

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

2) Potenziale di 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 $V = 0$:

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

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

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

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

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

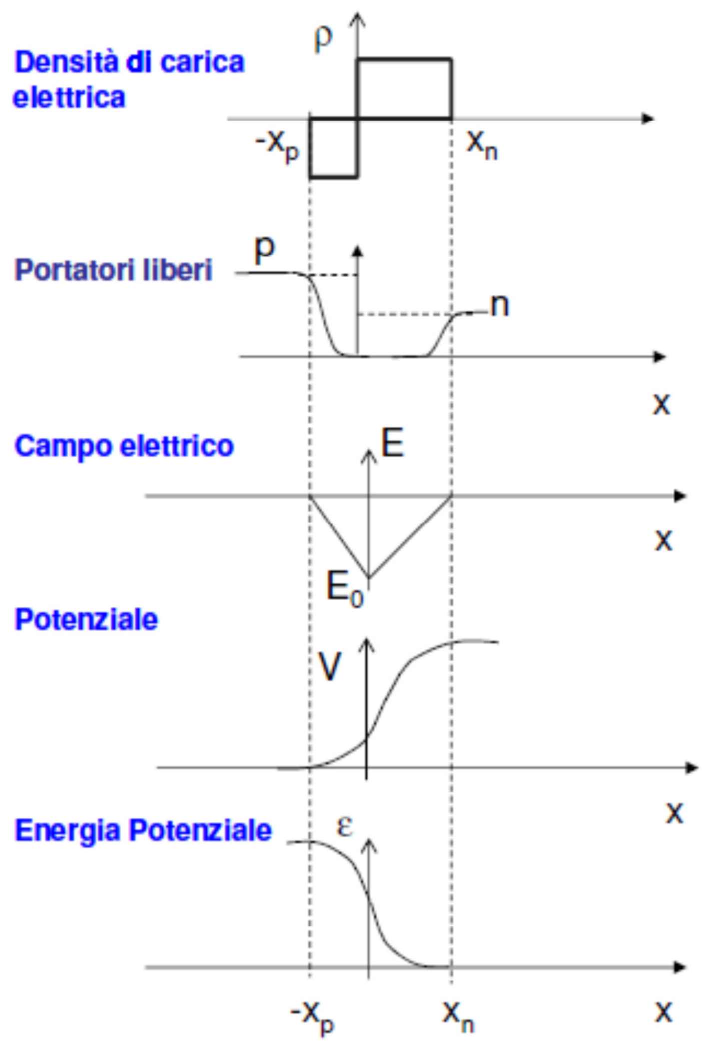
$$qN_A x_{p0} = qN_D x_{n0}$$

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

Larghezza dello strato di svuotamento:

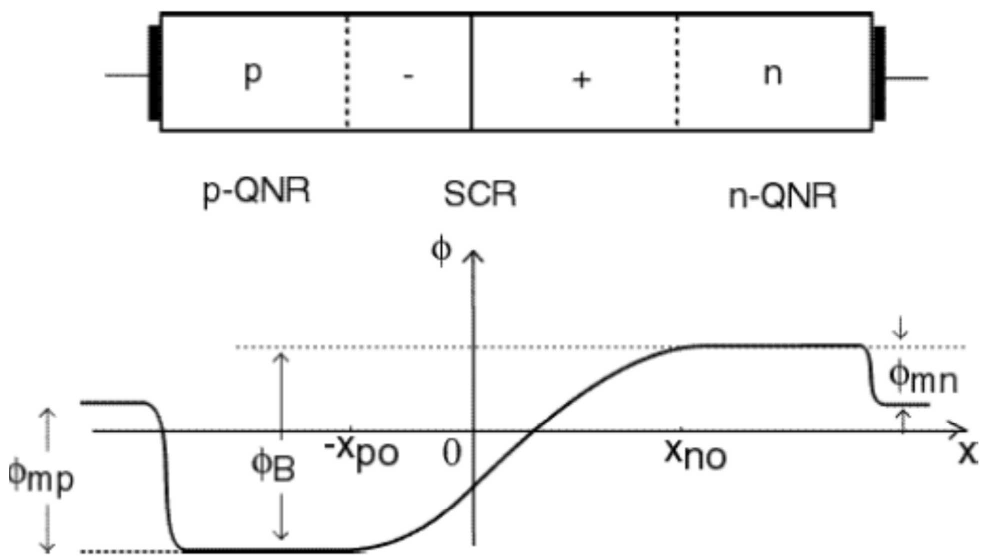
$$\left.\begin{aligned} x_{n0} &= \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_{bi} N_A}{q(N_A+N_D)N_D}} \\ x_{p0} &= \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_{bi} N_D}{q(N_A+N_D)N_A}} \end{aligned}\right\}$$

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



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':

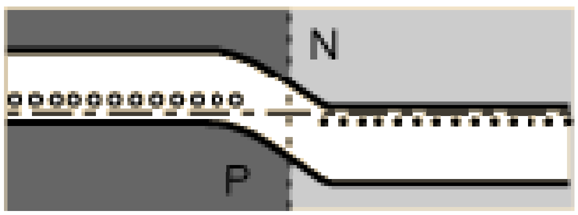
$$\begin{cases}\text{non si puo' misurare } V_{bi} \\ \text{non passa corrente in un circuito esterno}\end{cases}$$

Situazione diversa con polarizzazione esterna

Equilibrio:

La barriera di potenziale $(\leftarrow$ Campo elettrico dovuto alla carica spaziale$)$

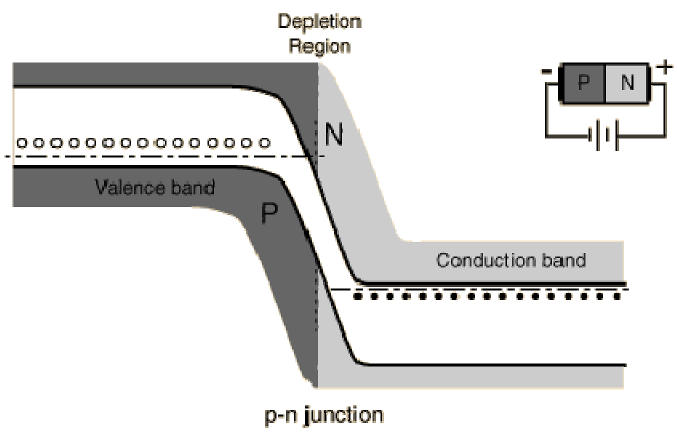
e' quella di built-in




Polarizzazione inversa:

Situazione simile, con barriera piu' alta

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




Polarizzazione diretta:

Situazione simile, con barriera piu' bassa

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