Dispositivi elettronici:

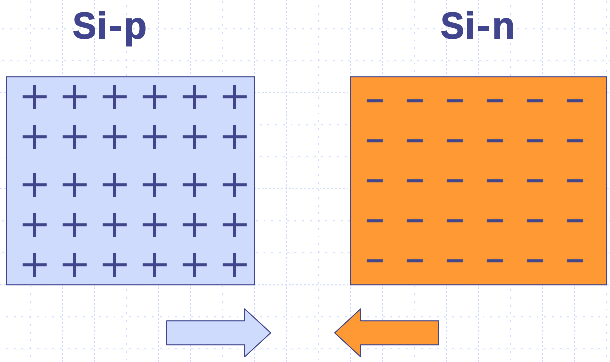
La giunzione pn

La giunzione *pn* **(2.4.1-4)**

Argomenti della Lezione

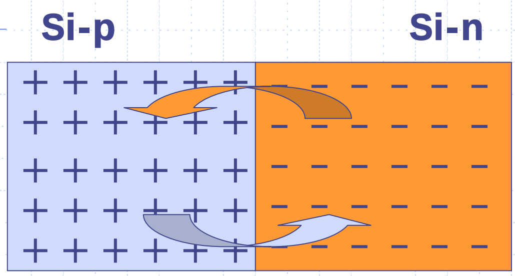
- Analisi della giunzione p-n
  - campo elettrico
  - potenziale di contatto
- Polarizzazione inversa
  - capacità di transizione
  - fenomeno del breakdown
- Polarizzazione diretta
  - equazione del diodo
- Caratteristica i-v del diodo

La giunzione *pn*



Supponiamo di avere a disposizione due blocchetti di silicio, uno drogato di tipo p e uno drogato tipo n.
Cosa succede se (idealmente) li mettiamo in contatto?

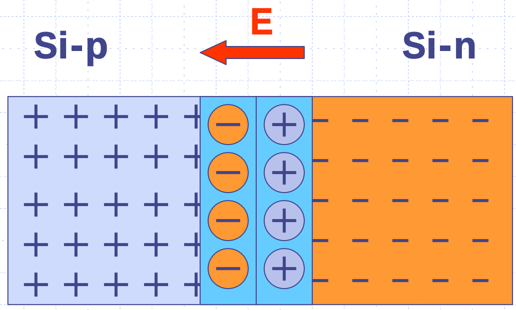
La giunzione *pn*



Se mettiamo a contatto Silicio drogato di tipo p con Silicio drogato tipo n, a causa degli elevati gradienti di concentrazione avremo **diffusione**:
lacune da Si-p a Si-n ed **elettroni da Si-n a Si-p**

Ma il processo non può procedere all'infinito altrimenti la giunzione sparirebbe

La giunzione *pn*

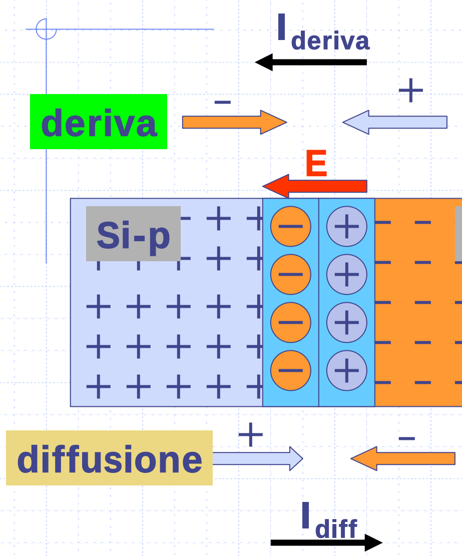


Cosa frena la diffusione?

La diffusione di portatori mobili lascia atomi ionizzati che danno luogo ad un CAMPO ELETTRICO, E

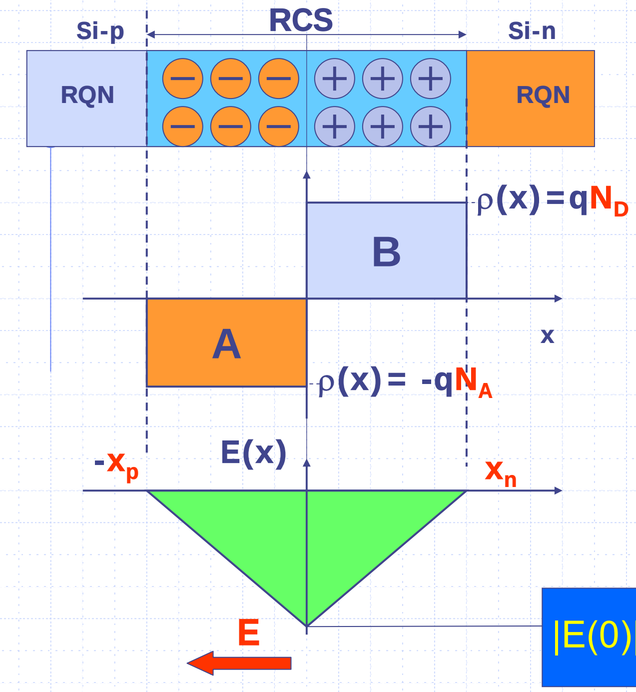
Ipotesi di svuotamento completo "a gradino":
l'interfaccia della giunzione risulta completamente svuotata di portatori mobili.

La giunzione *pn all'equilibrio*



Si raggiunge una condizione di equilibrio dinamico nella quale le due componenti di corrente si bilanciano e quindi risulta:

$$I_{diff} = I_{deriva}$$



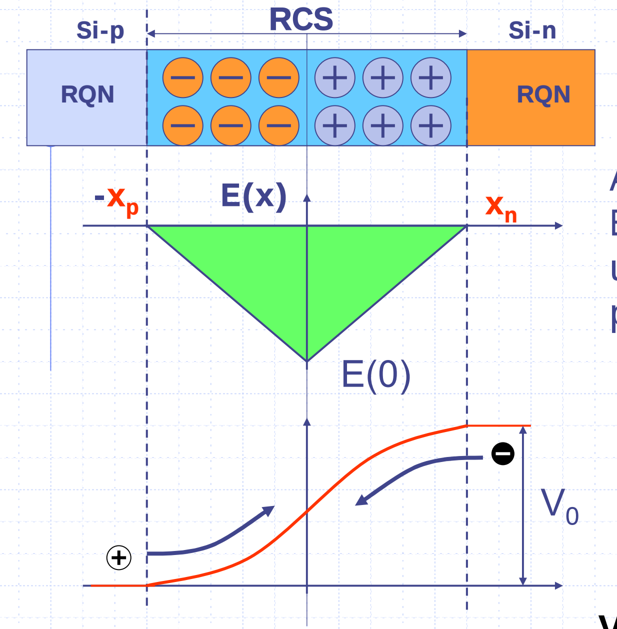
RQN = Regioni Quasi Neutre
RCS = Regione di Carica Spaziale o di Svuotamento

Carica netta e' nulla (A=B).
Usando l'eq. di Poisson:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\varepsilon_S}$$

e integrando:

$$|E(0)| = \frac{qN_A x_p}{\varepsilon_S} = \frac{qN_D x_n}{\varepsilon_S}$$



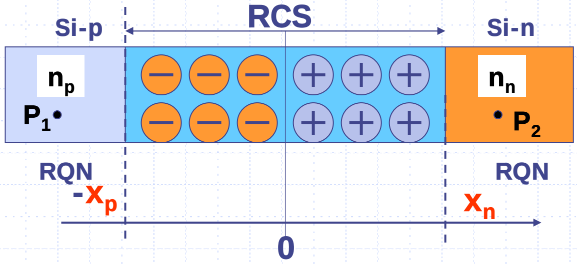
Al campo elettrico E(x) è associata una barriera di potenziale V_0:

$$\frac{dV}{dx} = -E(x)$$

V_0 = area sottesa dal campo elettrico

$$V_0 = \frac{|E(0)|(x_n + x_p)}{2}$$

Calcolo del potenziale di contatto



Consideriamo due punti P_1 e P_2 qualsiasi all'interno delle regioni quasi neutre. Le concentrazioni di elettroni nei due punti valgono:

$$P_1: \quad n_1 = n_p = \frac{n_i^2}{N_A} \qquad\qquad P_2: \quad n_2 = n_n = N_D$$

Calcolo del potenziale di contatto

All'equilibrio, la corrente totale di elettroni è nulla (così come quella di lacune):

$$J_{nx}(x) = q\mu_n n(x)E(x) + qD_n\frac{dn(x)}{dx} = 0$$

da cui:

$$n(x)\frac{dV(x)}{dx} = \frac{D_n}{\mu_n}\frac{dn(x)}{dx} \quad \Rightarrow \quad dV = V_T\frac{1}{n}dn$$

Integrando ambo i membri otteniamo:

$$\int_{V_1}^{V_2} dV = V_T\int_{n_1}^{n_2}\frac{1}{n}dn$$ e quindi: $$V_2 - V_1 = V_T \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Analogamente, per le cariche p si può ricavare:

$$V_2 - V_1 = V_T \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$

Potenziale di contatto V_0 all'equilibrio

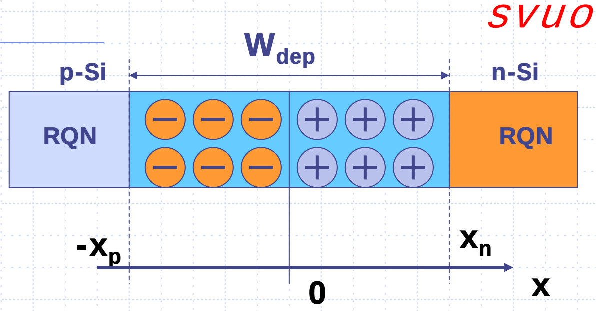
All'equilibrio, le concentrazioni in P_1 e P_2 sono quelle che si hanno nelle zone p e n, cioè $n_1=n_p=n_i^2/N_A$ e $n_2=N_D$. Perciò, sostituendo:

$$V_0=V_2-V_1= V_T \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) = V_T \ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right)$$

Che esprime la tensione di contatto V_0 in condizioni di equilibrio, in funzione delle concentrazioni N_A nella zona p e N_D nella zona n.

Lo stesso risultato si ottiene ragionando sulle cariche p anzichè sulle cariche n.

Giunzione *pn*, *regione di svuotamento*



$$W_{dep} = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)V_0} \qquad \frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

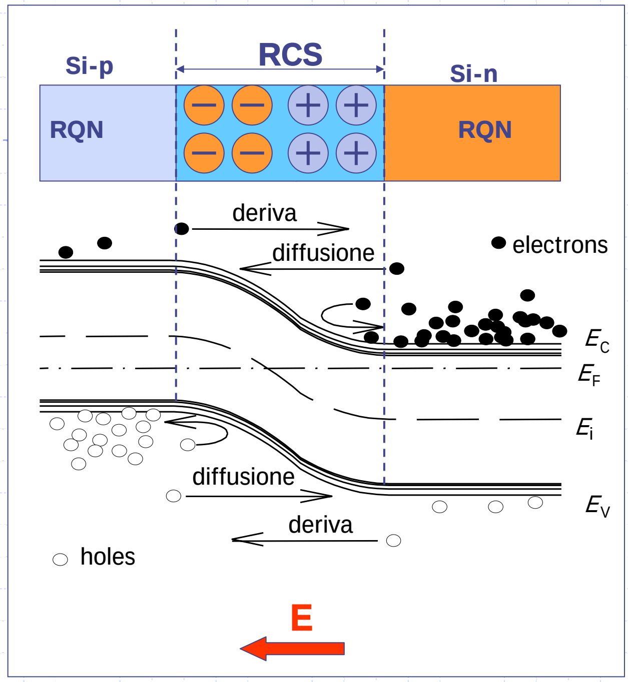
$\varepsilon_s = 1.04\ 10^{-12}$ F/cm $\qquad 0.1\mu m \le W_{dep} \le 1\mu m$

Giunzione *pn* regione di svuotamento

$$x_p = \frac{W_{dep}}{1 + \frac{N_A}{N_D}} \qquad x_n = \frac{W_{dep}}{1 + \frac{N_D}{N_A}}$$

Se $N_A >> N_D$, allora $x_p << x_n$
(la regione di svuotamento si estende quasi interamente nella regione n)

Se $N_A << N_D$, allora $x_p >> x_n$
(la regione di svuotamento si estende quasi interamente nella regione p)

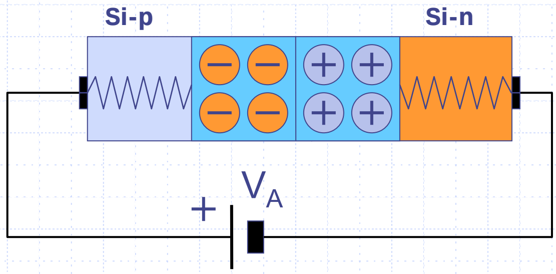


La giunzione *pn* all'equilibrio

Giunzione *pn* *polarizzata*

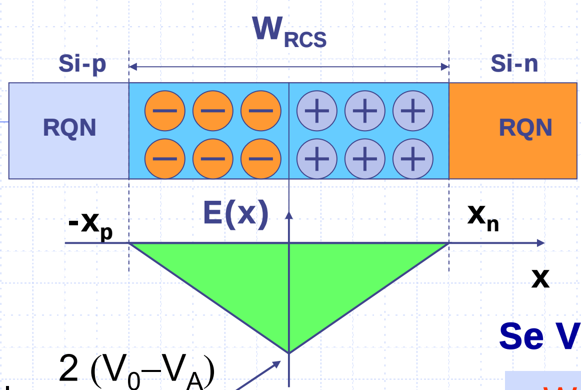
Ipotesi semplificative:
- Approssimazione di svuotamento
- Cadute di tensione trascurabili sui contatti e RQN
- Deboli correnti (bassa iniezione)

La tensione applicata V_A cade tutta alla giunzione.
La tensione sulla giunzione diventa $V_0 - V_A$.



$V_0 \Leftrightarrow V_0 - V_A$

Nota: positivo a p negativo a n



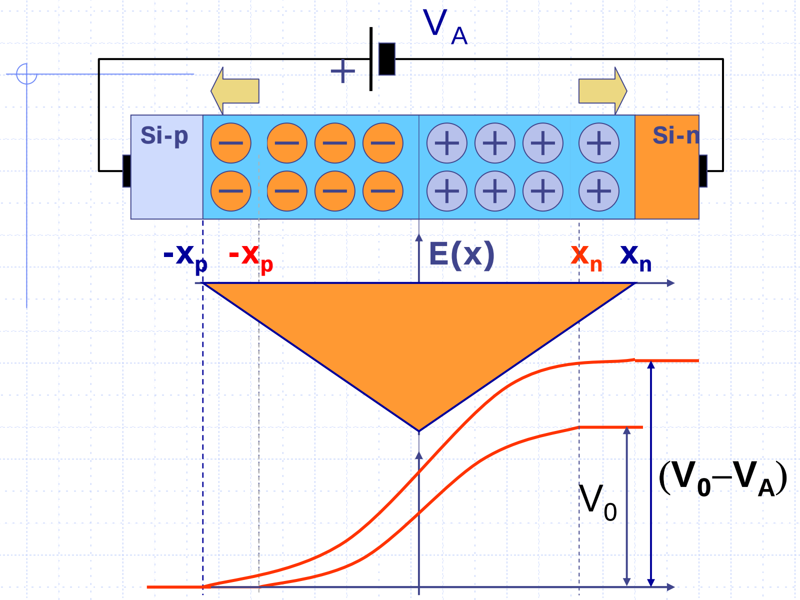
$$|E(0)| = \frac{2\,(V_0 - V_A)}{W_{dep}}$$

$$W_{dep} = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_0 - V_A)}$$

Se V_A aumenta:
- W_{dep} cala
- E(0) cala
- potenziale alla giunzione cala

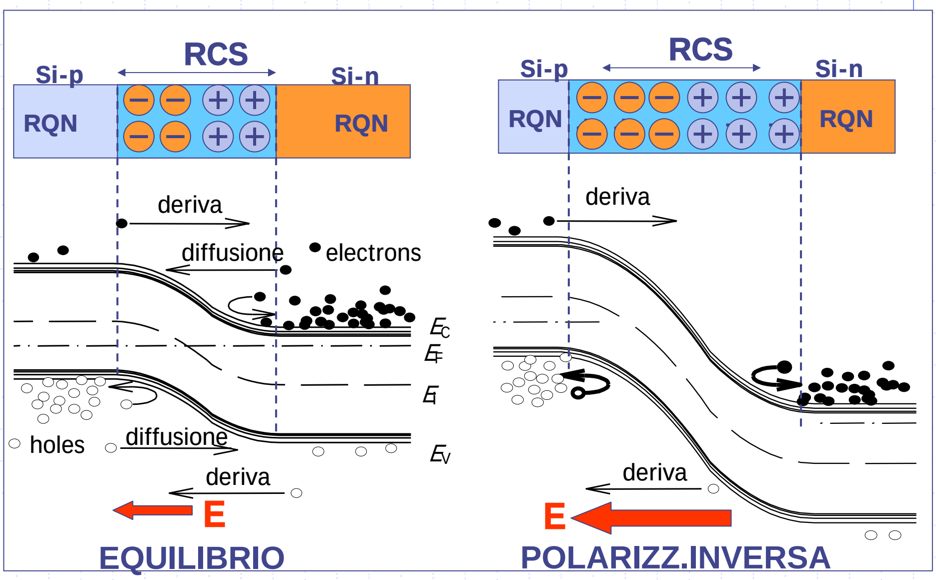
e viceversa

La giunz. *polarizzata in inversa* *(V_A<0)*



La giunz. *polarizzata in inversa* *(V_A<0)*

movimento dei portatori liberi



Capacita' parassite nei diodi
(Polarizzazione inversa)

$$W_{dep} = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_0 - V_A)} \qquad V_R = -V_A$$

$$W_{dep} = \sqrt{1 + \frac{V_R}{V_0}}\sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)V_0} \Rightarrow W_{dep} = \boxed{W_{d0}\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_0}}}$$

$$Q = qN_D x_n A = qN_A x_p A = q\left(\frac{N_D N_A}{N_D + N_A}\right)W_{dep}A$$

$$\boxed{Q = qAW_{d0}\frac{N_D N_A}{N_D + N_A}\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_0}}}$$

Capacita' parassite nei diodi
(Polarizzazione inversa)

$$Q = qAW_{d0}\frac{N_D N_A}{N_D + N_A}\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_0}}$$

$$C_j = \left.\frac{\partial Q}{\partial V_R}\right|_{V_R = V_Q}$$

Con alcuni passaggi algebrici si ottiene:

$$\boxed{C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_0}}}; \quad C_{j0} = A\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_S q}{2}\right)\left(\frac{N_D N_A}{N_D + N_A}\right)\left(\frac{1}{V_0}\right)}}$$

Si poteva ottenere partendo dalla: $C_j = \frac{A\varepsilon_S}{W_{dep}}$

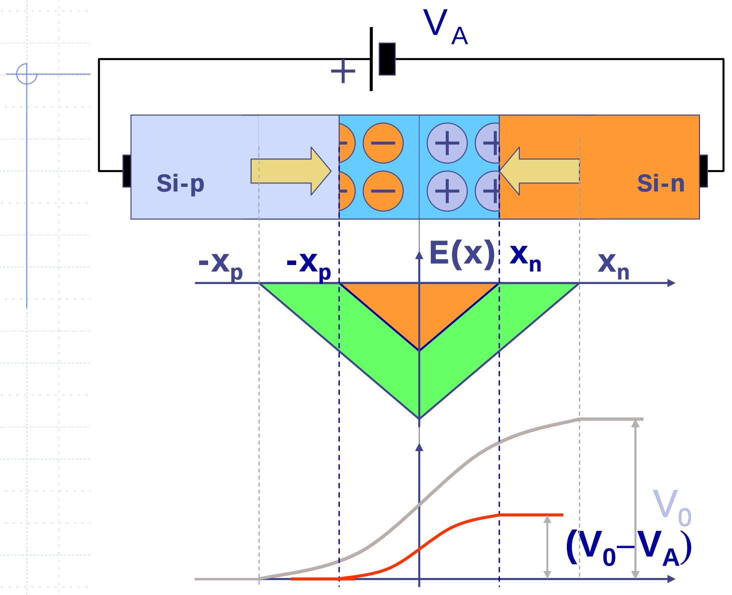
Breakdown ZENER

In giunzioni pesantemente drogate, la RCS risulta sottile ed il campo elettrico alla giunzione così elevato da riuscire a rompere legami covalenti e a creare coppie elettrone-lacuna con conseguente aumento della corrente inversa.

Breakdown a Valanga

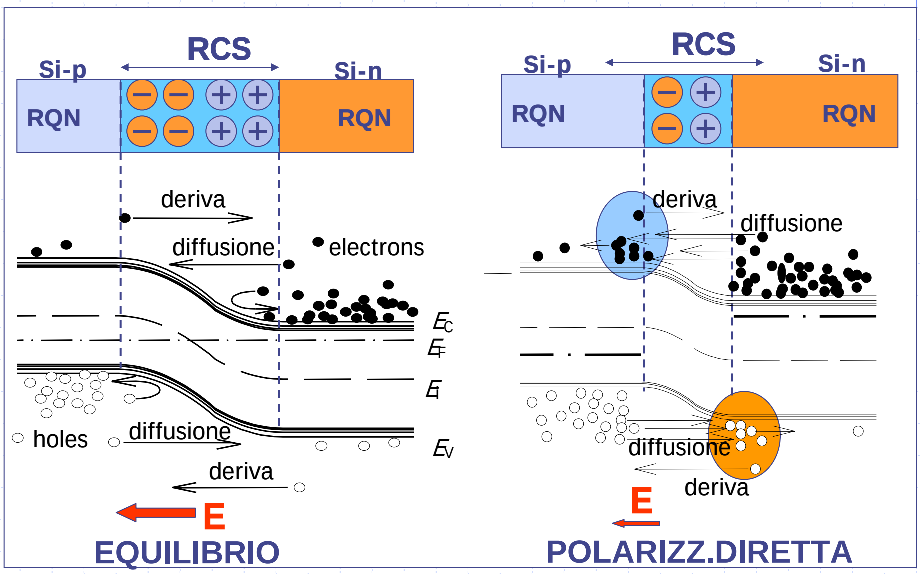
La velocità media di deriva dei portatori nella RCS è il risultato di continui urti con il reticolo cristallino (in cui viene ceduta energia) e movimento accelerato dal campo elettrico tra un urto e l'altro. Se l'energia cinetica acquisita durante la fase di accelerazione e ceduta al reticolo cristallino durante un urto è tale da rompere un legame covalente, si ha un effetto moltiplicativo ("a valanga") causato dai nuovi portatori così prodotti che, a loro volta vengono accelerati dal campo elettrico e possono provocare la rottura di altri legami covalenti

La giunzione *polarizzata diretta* (V_A>0)



La giunz. *polarizzata in diretta* (V_A>0)

movimento dei portatori liberi



La giunzione *polarizzata*
Concentrazioni ai bordi della RCS

Se la tensione applicata $V_A \neq 0$, cambiano le concentrazioni ai bordi $-x_p$ e x_n della RCS (Regione di Carica Spaziale). Per l'ipotesi di deboli correnti (bassa iniezione), sono ancora valide le relazioni tra potenziale di contatto e concentrazioni:

$$V_2 - V_1 = V_T \ln\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \qquad V_2 - V_1 = V_T \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)$$

La giunzione *polarizzata*
Concentrazioni ai bordi della RCS

Ad es., per le cariche p, per la presenza degli accettori nella zona p è $p_1 = N_A$, e nella zona n, all'ascissa x_n, la concentrazione dei portatori minoritari $p_2 = p_n(x_n)$ è data dalla relazione col potenziale di contatto $V_0 - V_A$:

$$V_0 - V_A = V_2 - V_1 = V_T \ln\left(\frac{N_A}{p_2}\right)$$

da cui

$$p_2 = p_n(x_n) = N_A\, e^{\frac{V_A - V_0}{V_T}} = p_{n0}\, e^{\frac{V_A}{V_T}}$$

Dove p_{n0} è la concentrazione di lacune nella zona n all'equilibrio, quando $V_A = 0$. Analogamente nella zona p, a $-x_p$, si ha:

$$n_1 = n_p(-x_p) = N_D\, e^{\frac{V_A - V_0}{V_T}} = n_{p0}\, e^{\frac{V_A}{V_T}}$$

La giunzione *polarizzata*
portatori minoritari

Nella zona n, definendo:

$$p'_n(x) = p_n(x) - p_{n0}$$

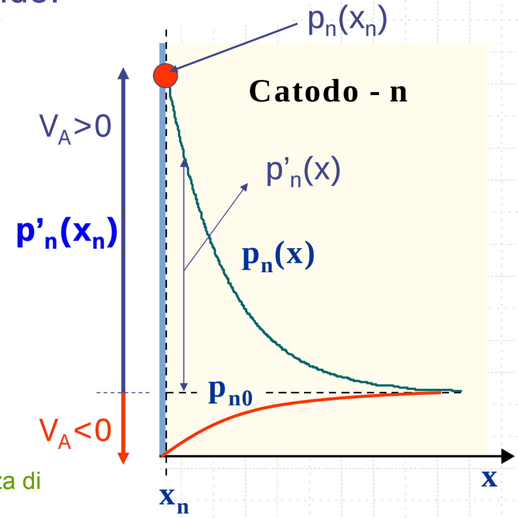
Risulta:

$$p'_n(x_n) = p_{n0}\left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1\right)$$

Per $x>x_n$ la distribuzione $p'_n(x)$ si ricava dall'eq. di continuità:

$$p'_n(x) = p'_n(x_n)\, e^{-\frac{x-x_n}{L_p}}$$

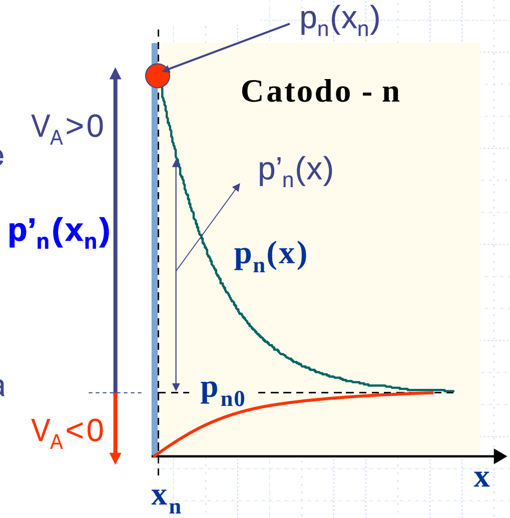
$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$ ⟸ Lunghezza di diffusione



La giunzione *polarizzata*
portatori minoritari

Dall'equazione di continuità, avendo trascurato il campo elettrico nelle regioni quasi neutre, l'eccesso di cariche minoritarie $p'_n(x)$ tende esponenzialmente a 0.

Analoga distribuzione si ha per l'eccesso di cariche minoritarie $n'_p(x)$ nella zona p.



La giunzione *polarizzata*

portatori minoritari

In polarizzazione diretta si crea un eccesso di portatori minoritari $p'_n(x_n)$ (rispetto alla condizione di equilibrio), in prossimità della RCS, che cresce esponenzialmente con la tensione applicata V_A:

- eccesso di lacune nella regione n
- ed eccesso di elettroni nella regione p.

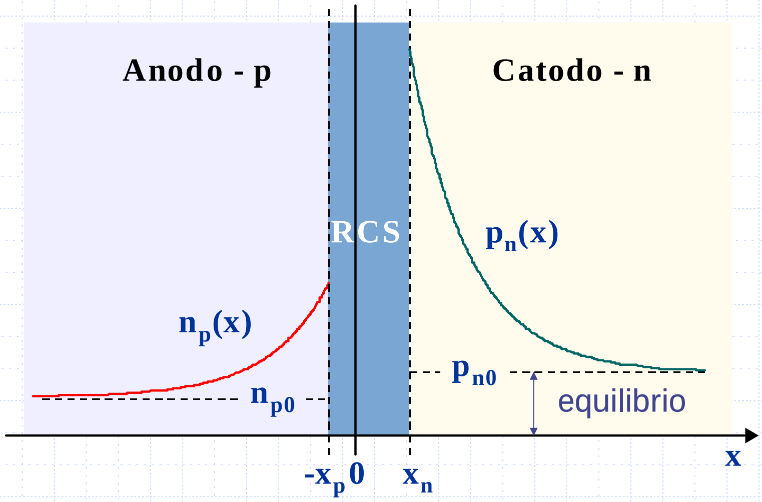
Al contrario, in polarizzazione inversa, rispetto alla condizione di equilibrio, si crea un difetto di portatori minoritari in prossimità della RCS.

La giunzione *polarizzata*

portatori minoritari ($N_A > N_D$)

Polarizzazione diretta, $V_A>0$

Diodo: $V_D > 0$

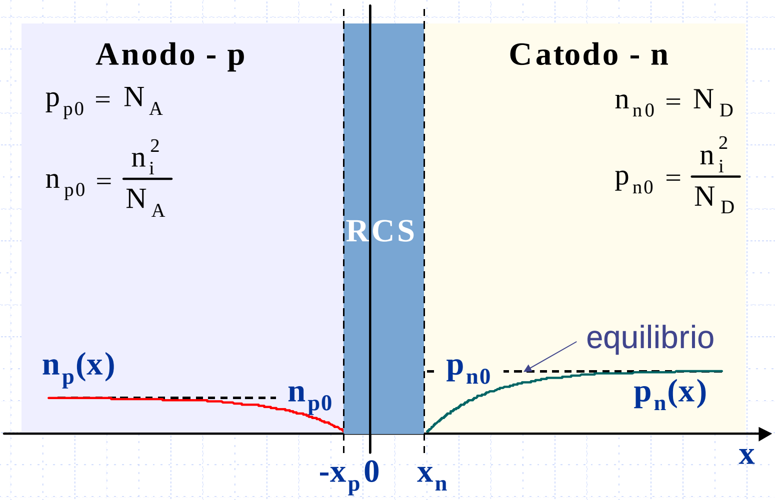


La giunzione *polarizzata*

portatori minoritari ($N_A > N_D$)

Polarizzazione inversa, $V_A<0$

Diodo: $V_D < 0$

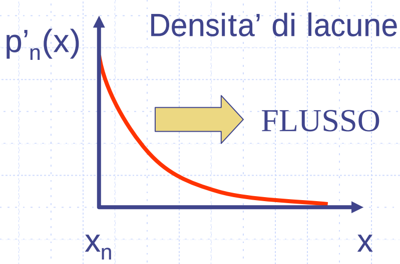


La giunzione *polarizzata*

Corrente nella giunzione pn

$$p_n'(x) = p_n'(x_n)\, e^{-\frac{x-x_n}{L_p}}$$

per $x > x_n$



Corrente di diffusione:

$$J_p(x) = -qD_p \frac{\partial p_n'(x)}{\partial x}$$

Corrente di lacune

E dalle relazioni precedenti:

$$J_p(x) = q\frac{D_p}{L_p} p_{n0}\left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1\right) e^{-\frac{x-x_n}{L_p}}$$

per $x > x_n$

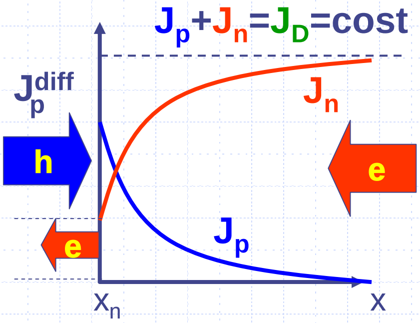
J_p e' massima in $x=x_n$ e poi decade in modo esponenziale con lunghezza di diffusione L_p.

La giunzione *polarizzata*

Corrente nella giunzione pn

(1) Le lacune vengono continuamente iniettate nel Silicio tipo n;

(2) In presenza del gran numero di elettroni si ricombinano (lontano dalla giunzione non ci sono lacune in eccesso, $p'_n(x) \rightarrow 0$;



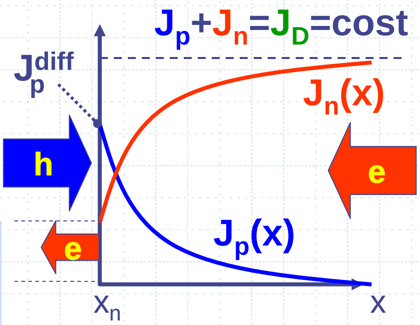
(3) Vengono richiamati elettroni che si ricombinano con le lacune iniettate (dando una corrente verso destra);

(4) In regime stazionario, la corrente lungo il diodo è costante.

La giunzione *polarizzata*

Corrente nella giunzione pn

Consideriamo gli andamenti della corrente nella zona n



$$J_p(x) = q\frac{D_p}{L_p}p_{n0}\left(e^{\frac{V_A}{V_T}}-1\right)e^{-\frac{x-x_n}{L_p}}$$

per $x > x_n$

$$J_p^{diff} = J_p(x_n) = q\frac{D_p}{L_p}p_{n0}\left(e^{\frac{V_A}{V_T}}-1\right)$$

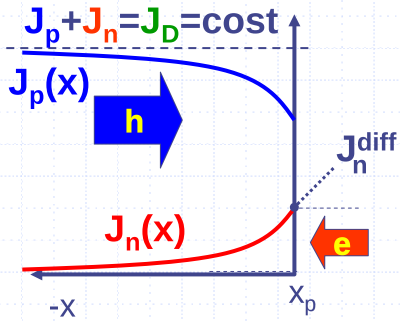
La giunzione *polarizzata*

Corrente nella giunzione pn

$$J_p^{diff} = J_p(x_n) = q\frac{D_p}{L_p}p_{n0}\left(e^{\frac{V_A}{V_T}}-1\right)$$

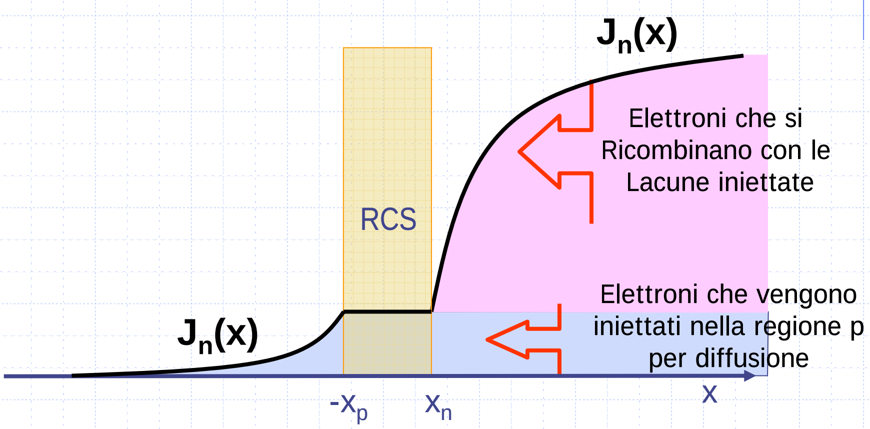
IN MODO ANALOGO NELLA ZONA P:

$$J_n^{diff} = J_n(-x_p) = q\frac{D_n}{L_n}n_{p0}\left(e^{\frac{V_A}{V_T}}-1\right)$$



La giunzione *polarizzata*

Corrente di elettroni

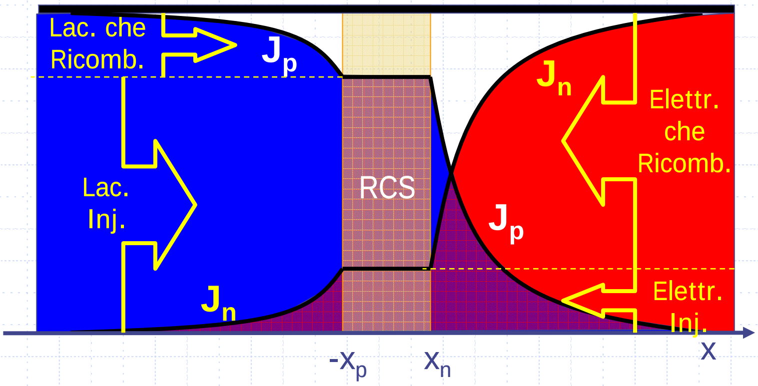


La giunzione *polarizzata*

$N_A > N_D$

CORRENTE TOTALE

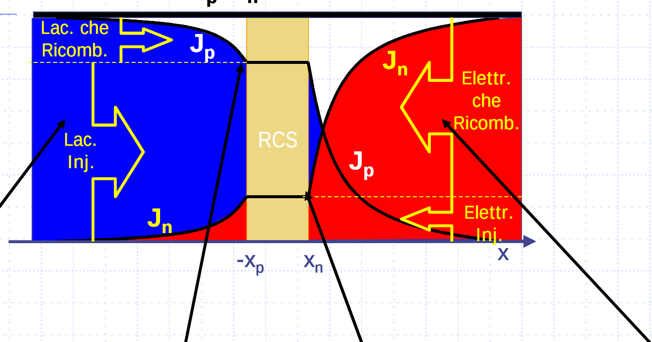
$J_p + J_n =$ **cost**



La giunzione *polarizzata*

$N_A > N_D$

$J_p + J_n =$ **cost**



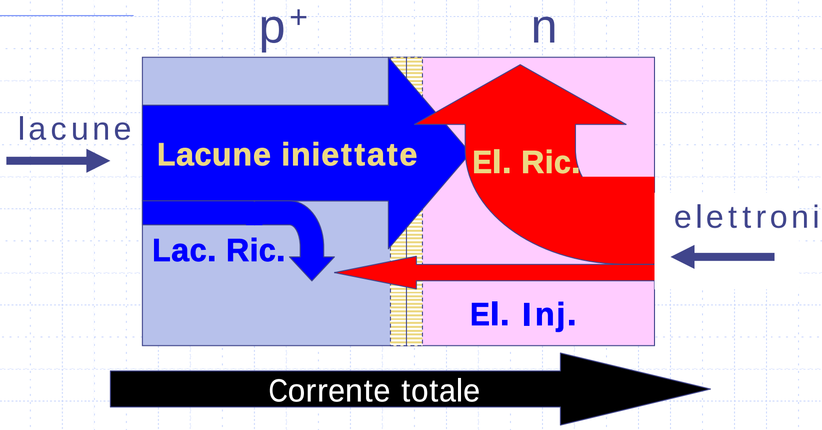
Lontano dalla giunzione, nella regione "p", ho corrente di sole lacune

alla giunzione $J_p > J_n$ perché è $N_A > N_D$

Lontano dalla giunzione, nella regione "n", ho corrente di soli elettroni

La giunzione *polarizzata*

CORRENTE TOTALE



Se $N_A > N_D$:

Lac. Iniettate > El. Iniettati.

Lac. Ric < El. Ric.

La giunzione *polarizzata*

CORRENTE TOTALE

$$I = A\left[J_p(x_n) + J_n(-x_p)\right]$$

$$I = A\left(\frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n}\right)\left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1\right)$$

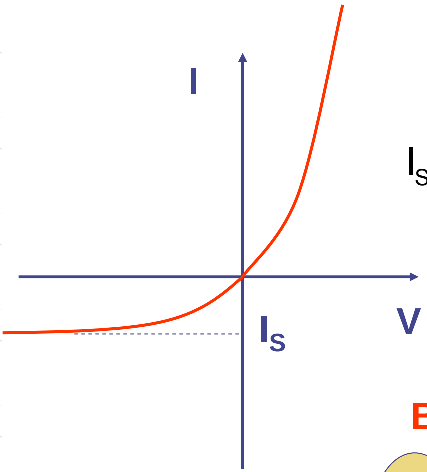
E ricordando che $p_{no} = \dfrac{n_i^2}{N_D}$ $\quad n_{po} = \dfrac{n_i^2}{N_A}$

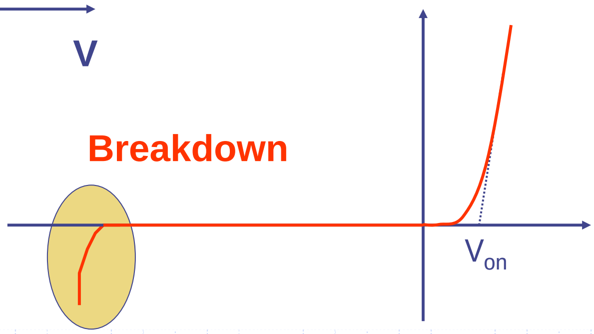
$$I = Aqn_i^2\left(\frac{D_p}{N_D L_p} + \frac{D_n}{N_A L_n}\right)\left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1\right) = I_S\left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1\right)$$

Caratteristica I-V della giunzione PN

$$I = I_s\left(e^{V/V_T} - 1\right)$$

$$I_S = Aqn_i^2\left(\frac{D_p}{L_pN_D} + \frac{D_n}{L_nN_A}\right)$$





Capacità di diffusione nei diodi

(Polarizzazione diretta)

$$Q_p = \int_{x_n}^{\infty} p_n^{'}(x)dx$$

$$= AqL_pp_{n0}\left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1\right) = I_p\tau_p$$

Analogamente: $Q_n = I_n\tau_n$

Quindi: $Q = I_n\tau_n + I_p\tau_p = I\tau_T$

$$\boxed{C_d = \left.\frac{\partial Q}{\partial V_A}\right|_{V_A=V_Q} = \left(\frac{\tau_T}{V_T}\right)\cdot I}$$

Capacità di DIFFUSIONE