



Dispositivi elettronici:

La giunzione pn

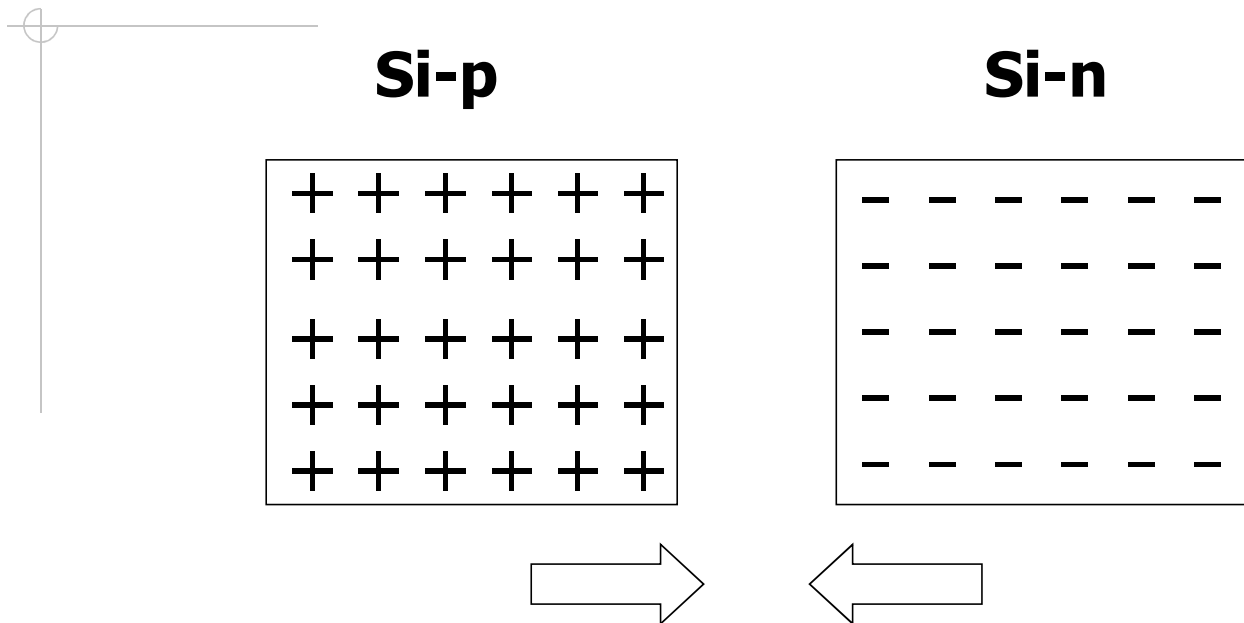


La giunzione ***pn*** (2.4.1-4)

Argomenti della Lezione

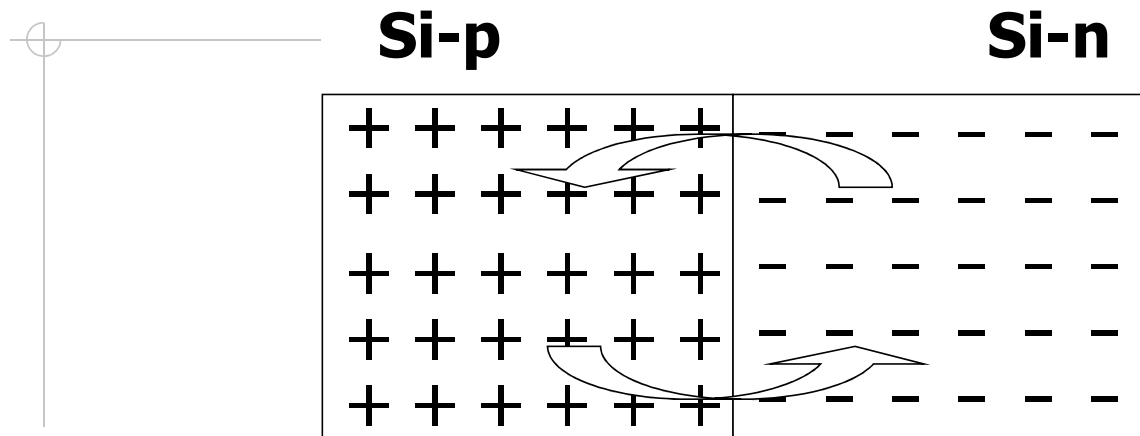
- ◆ Analisi della giunzione p-n
 - campo elettrico
 - potenziale di contatto
- ◆ Polarizzazione inversa
 - capacità di transizione
 - fenomeno del breakdown
- ◆ Polarizzazione diretta
 - equazione del diodo
- ◆ Caratteristica i-v del diodo

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*

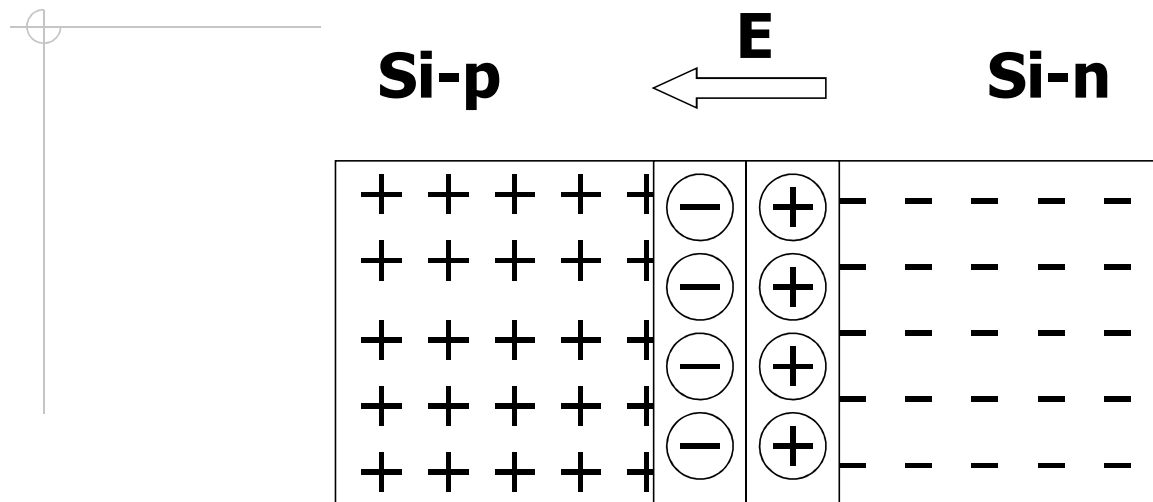


Se mettiamo a contatto Silicio drogato di tipo p con Silicio drogato tipo n, a causa degli elevati gradienti di concentrazione avremo **diffusione**:

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*

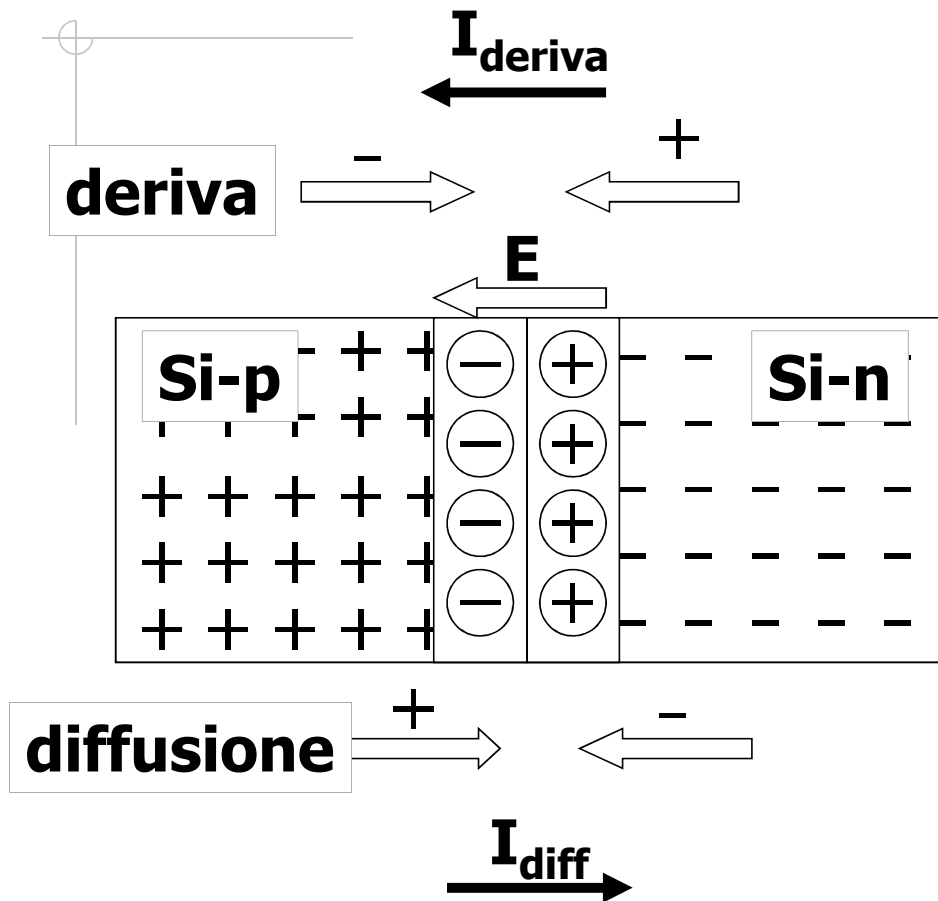


Cosa frena la diffusione?

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

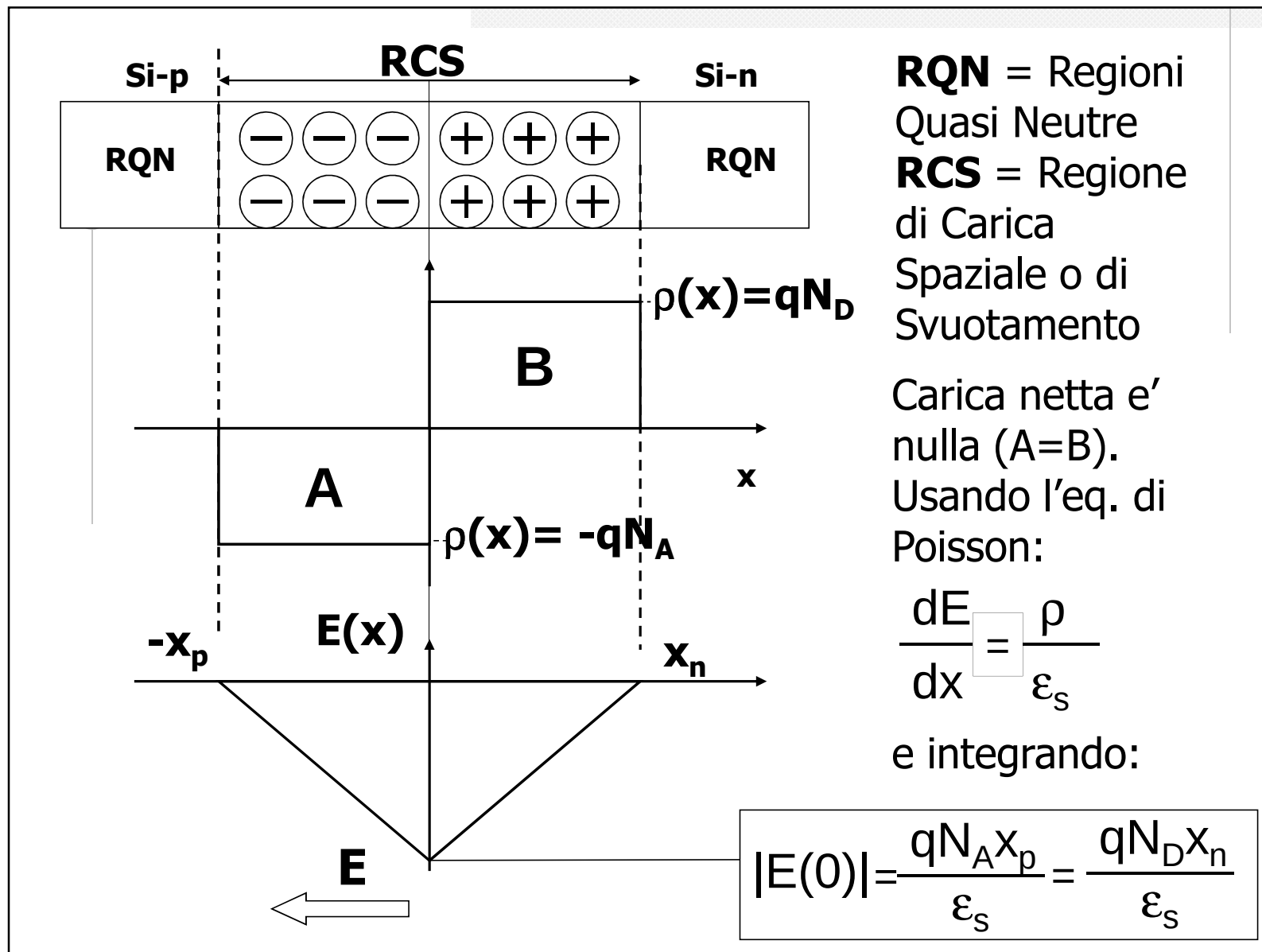
Ipotesi di svuotamento completo “a gradino”:
l'interfaccia della giunzione risulta completamente svuotata di portatori mobili.

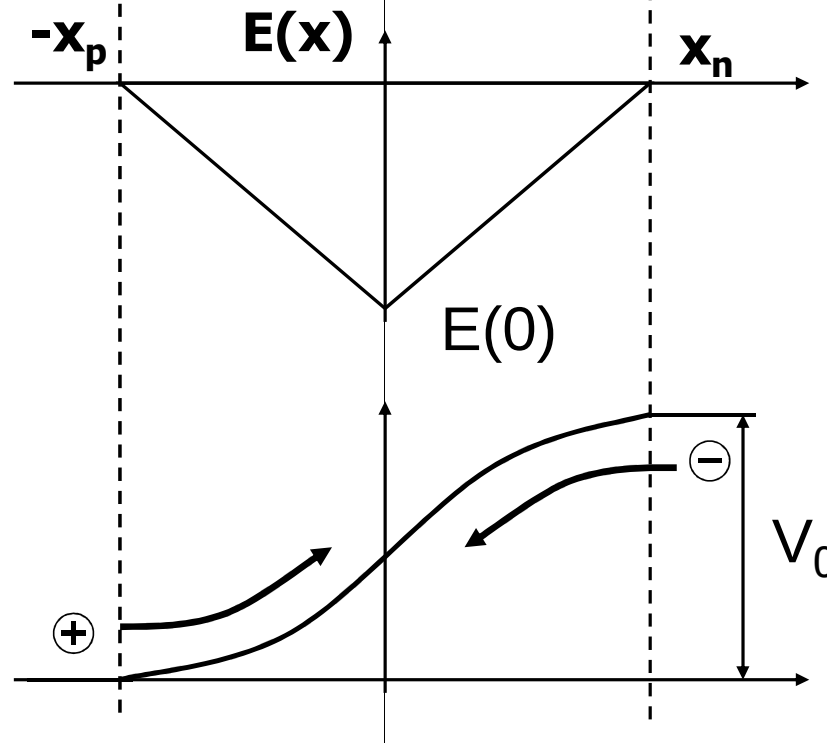
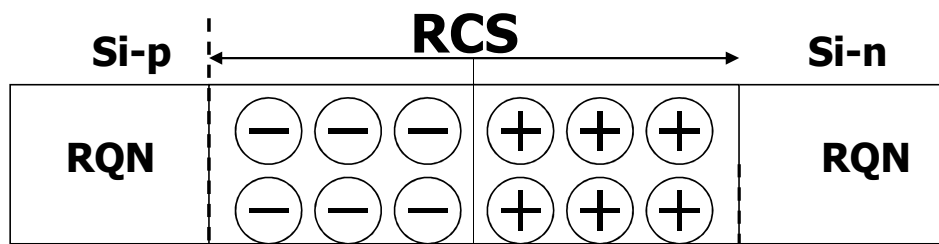
La giunzione *pn* all'equilibrio



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

$$I_{\text{diff}} = I_{\text{deriva}}$$





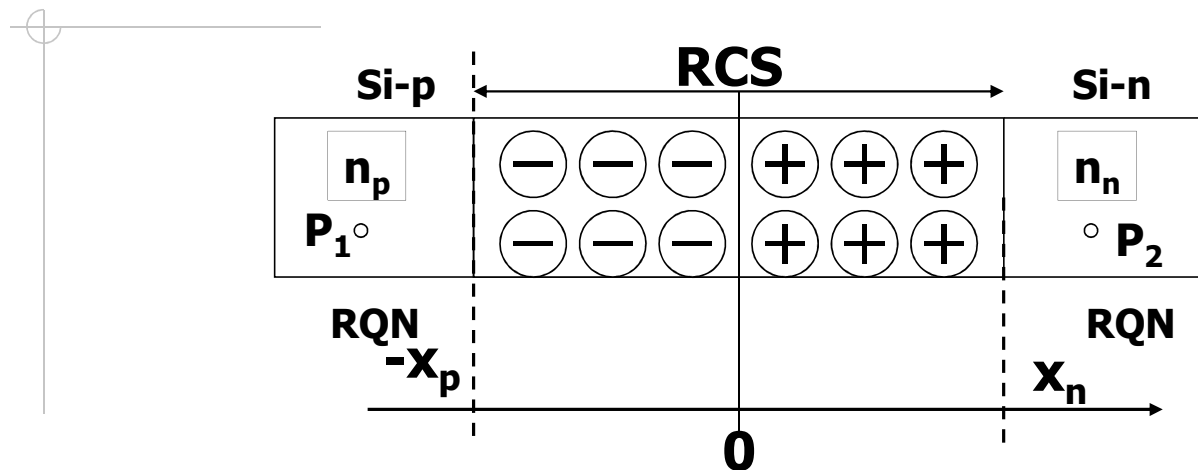
$V_0 = \text{area sottesa dal campo elettrico}$

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

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

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

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:

$$P_1 : n_1 = n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$P_2 : n_2 = n_n = N_D$$

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:

$$\int_{V_1}^{V_2} dV = V_T \int_{n_1}^{n_2} \frac{1}{n} dn \quad \text{e quindi:}$$

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

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

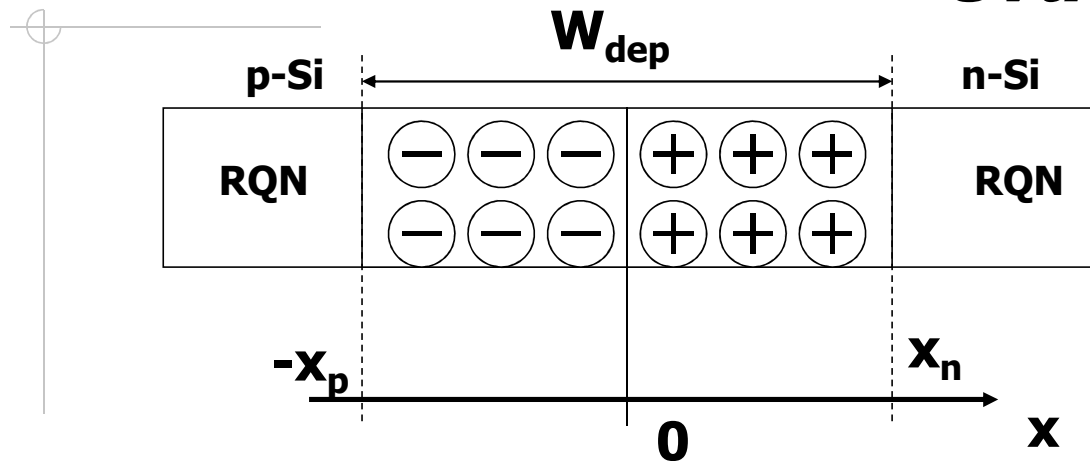
All'equilibrio, le concentrazioni in P_1 e P_2 sono quelle che si hanno nelle zone p e n, cioè $n_1 = n_p = n_i^2 / N_A$ e $n_2 = N_D$.
Perciò, sostituendo:

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

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*



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

$$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$$

$$\epsilon_s = 1.04 \cdot 10^{-12} \text{ F/cm}$$

$$0.1 \mu\text{m} \leq W_{dep} \leq 1 \mu\text{m}$$

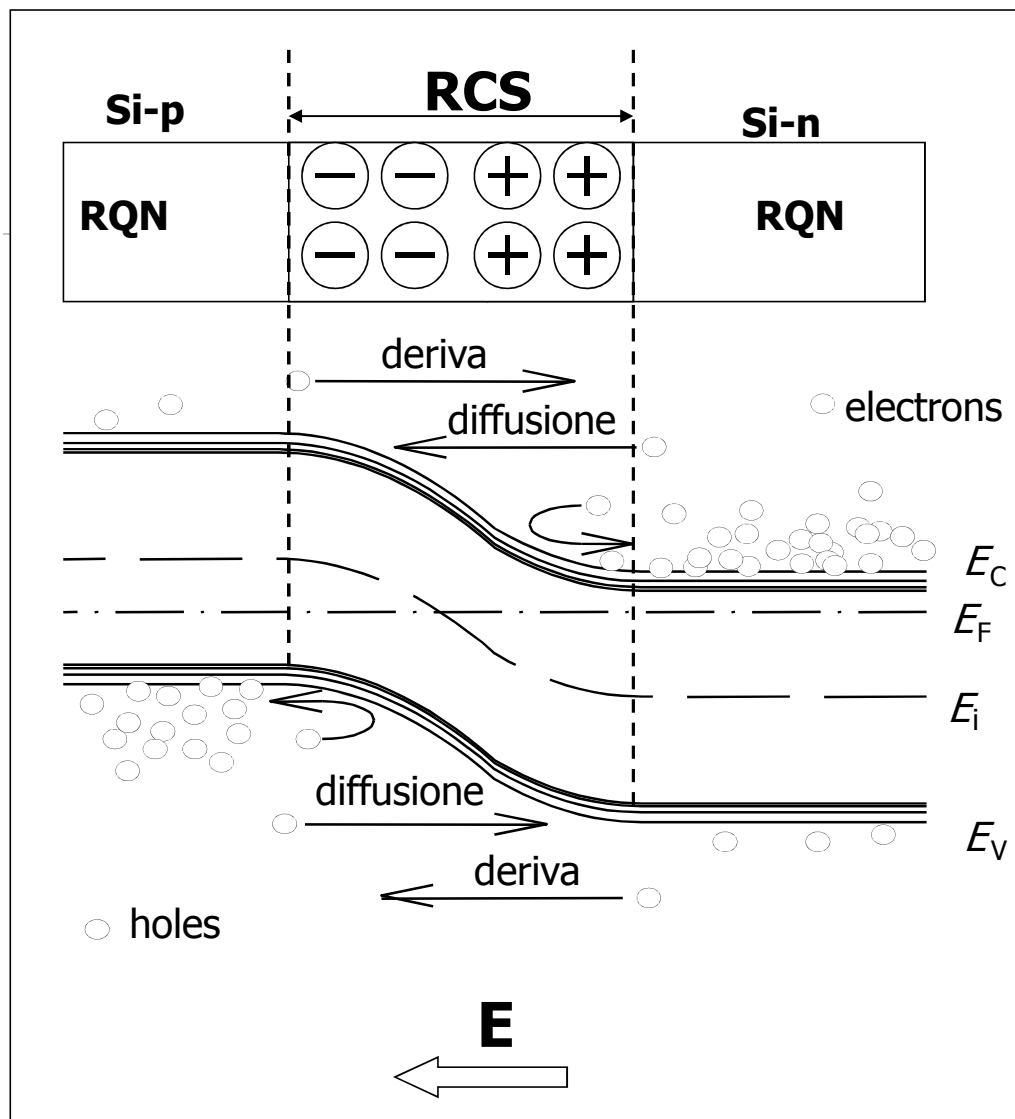
Giunzione ***pn*** regione di ***svuotamento***

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

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

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

La giunzione *pn* all' *equilibrio*

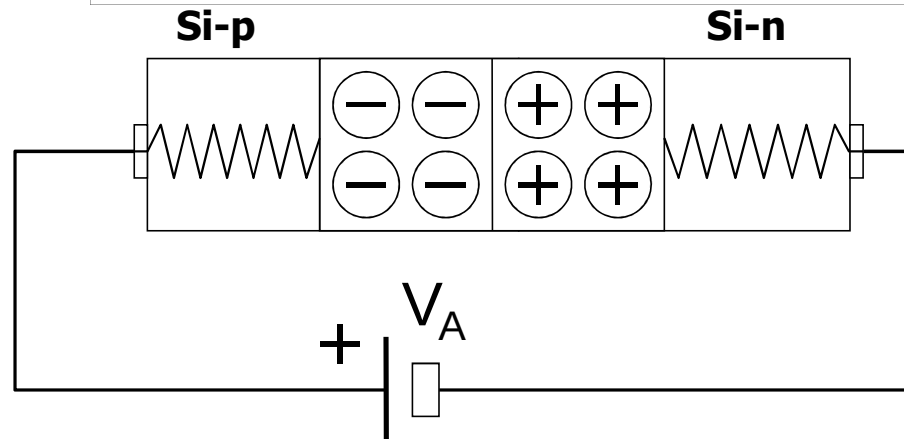


Giunzione *pn* polarizzata

Ipotesi semplificative:

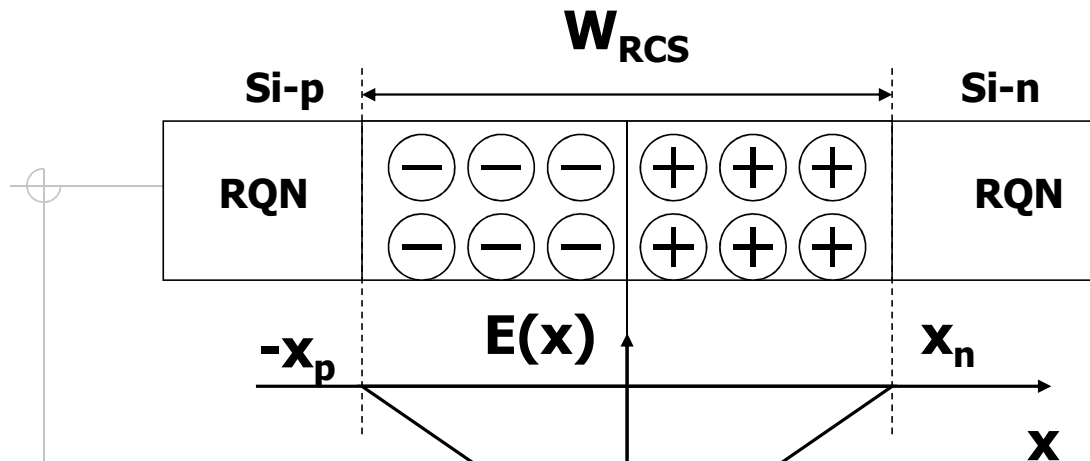
- Approssimazione di svuotamento
- Cadute di tensione trascurabili sui contatti e RQN
- Deboli correnti (bassa iniezione)

**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**



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

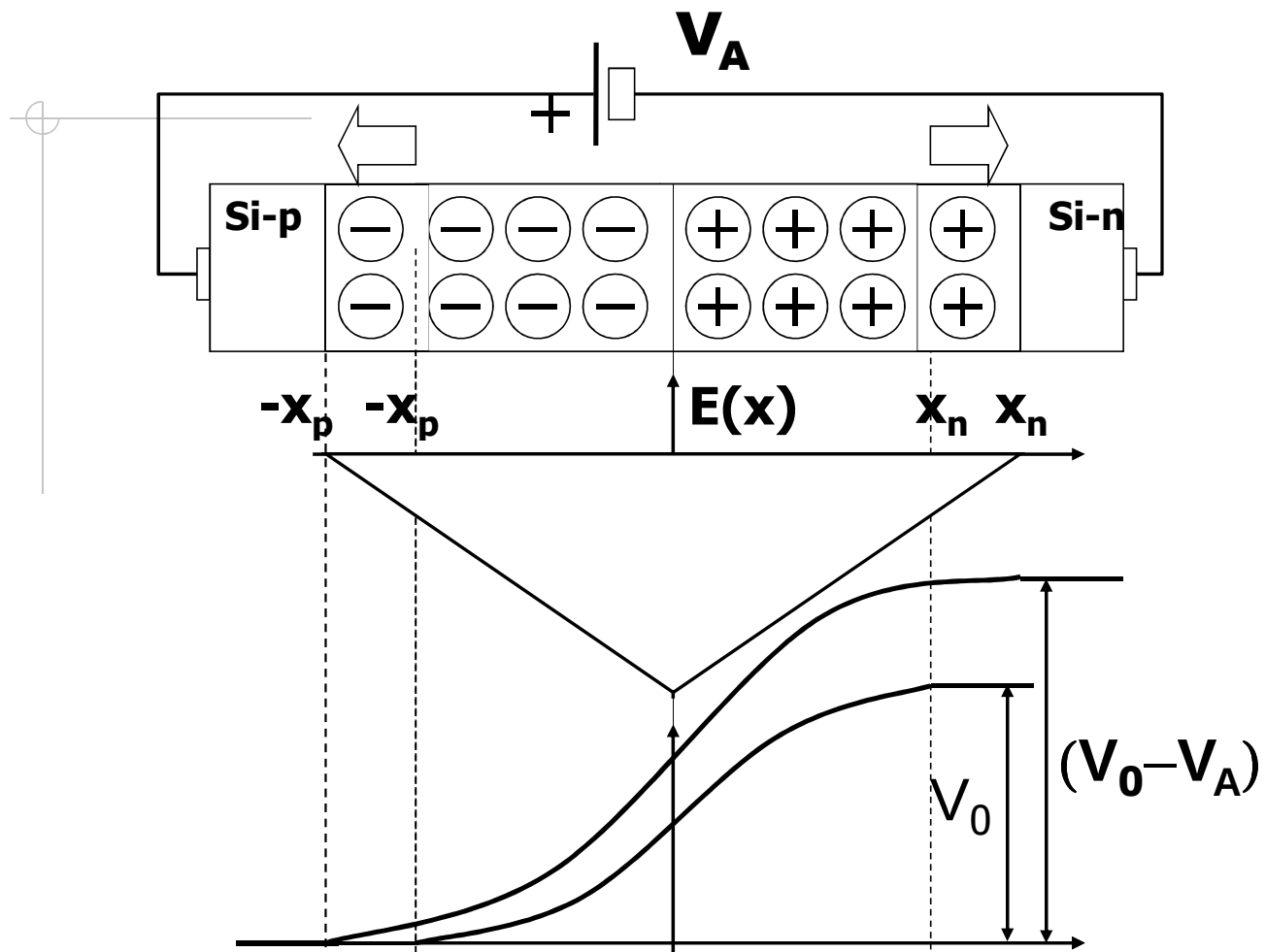
$$W_{dep} = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_0 - V_A)}$$

Se V_A aumenta:

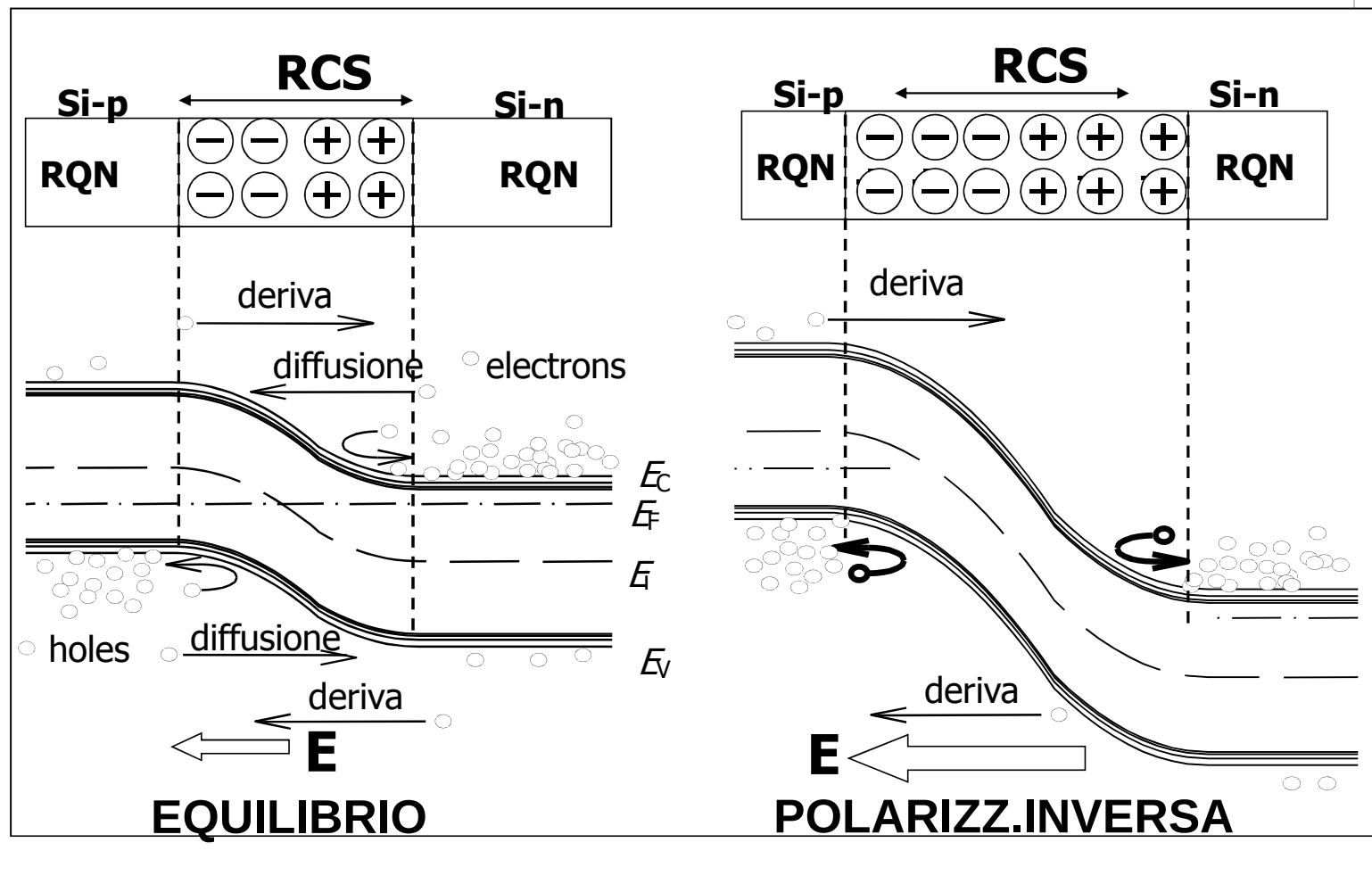
- W_{dep} cala
- $E(0)$ cala
- potenziale alla giunzione cala

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)

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

$$V_R = -V_A$$

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

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

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

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:

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

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

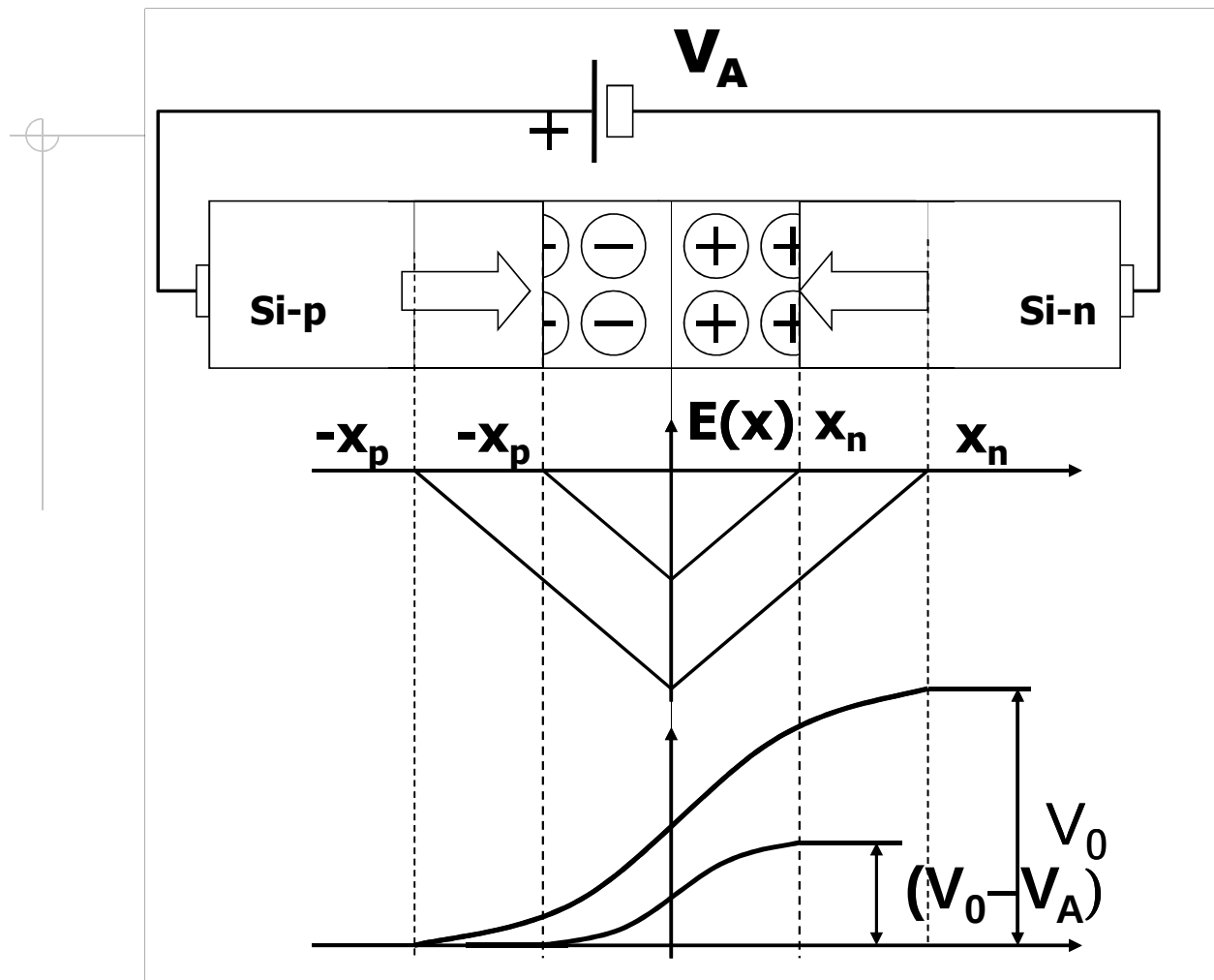
Breakdown ZENER

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.

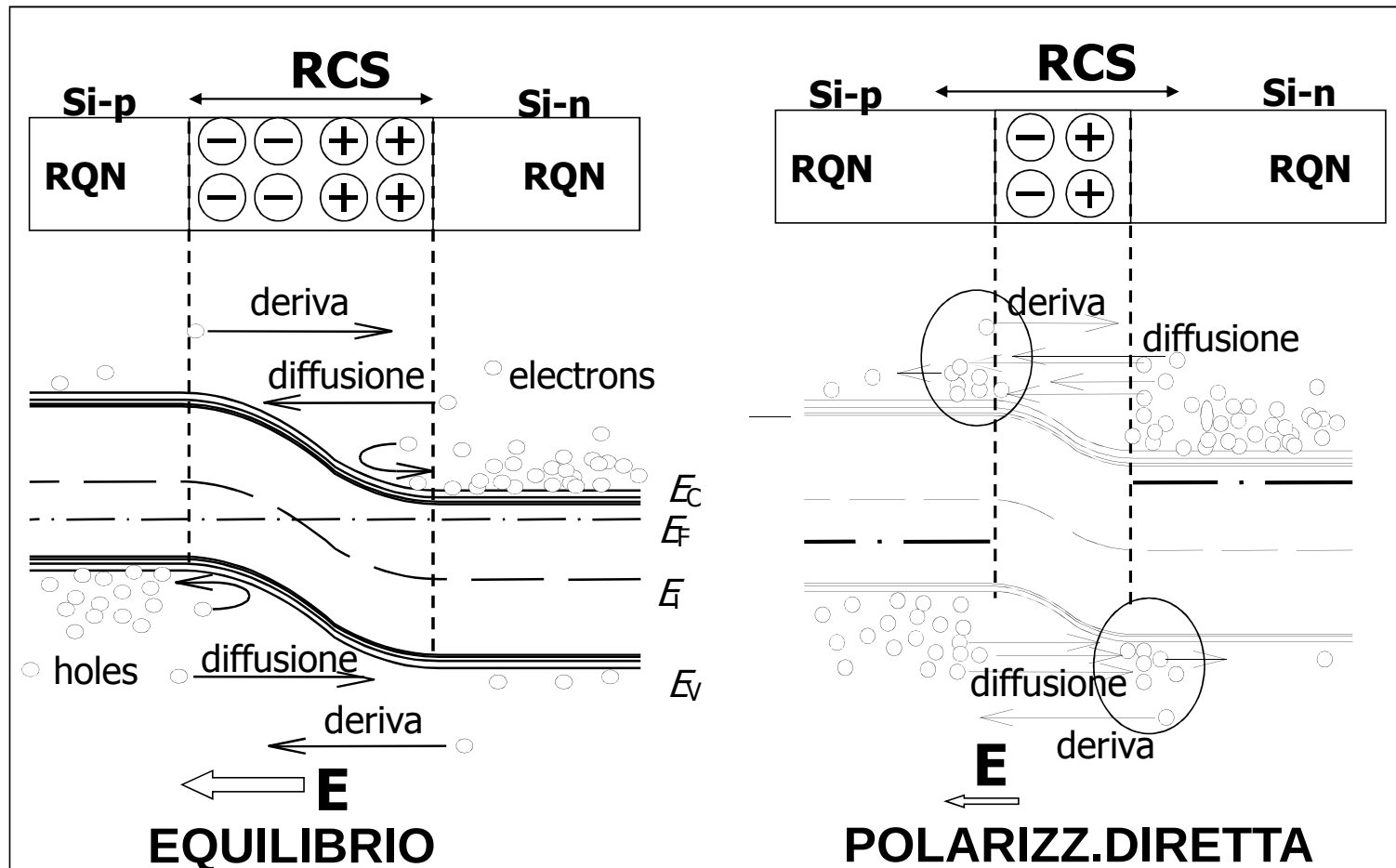
Breakdown a Valanga

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:

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

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

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:

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

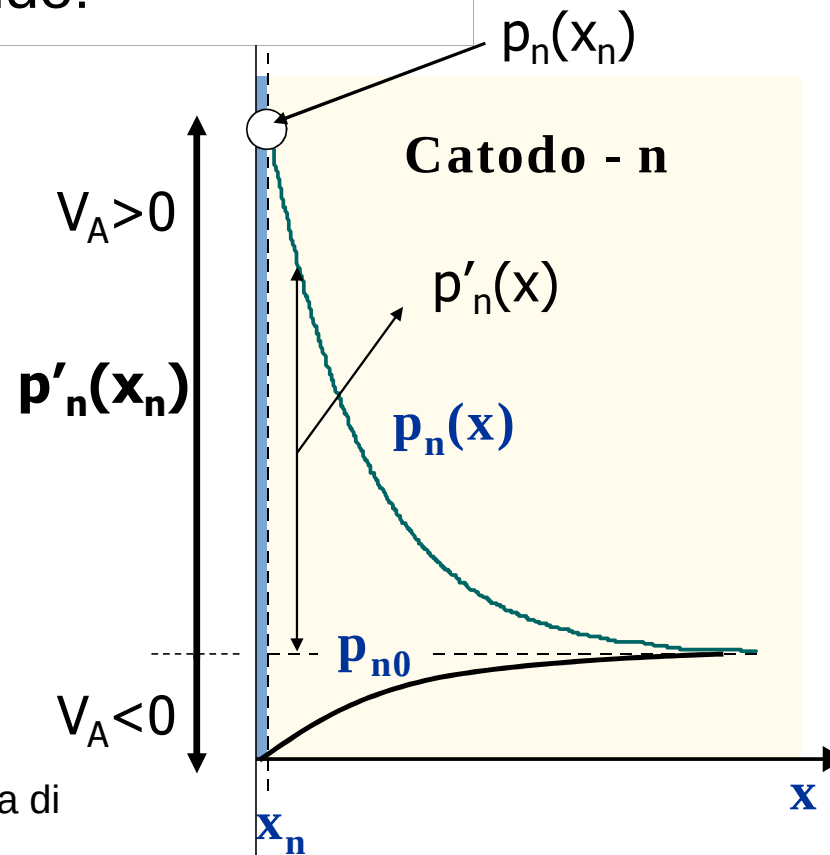
Risulta:

$$p'_n(x_n) = p_{n0} \left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1 \right) \quad V_A > 0$$

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

$$p'_n(x) = p'_n(x_n) e^{-\frac{x-x_n}{L_p}} \quad V_A < 0$$

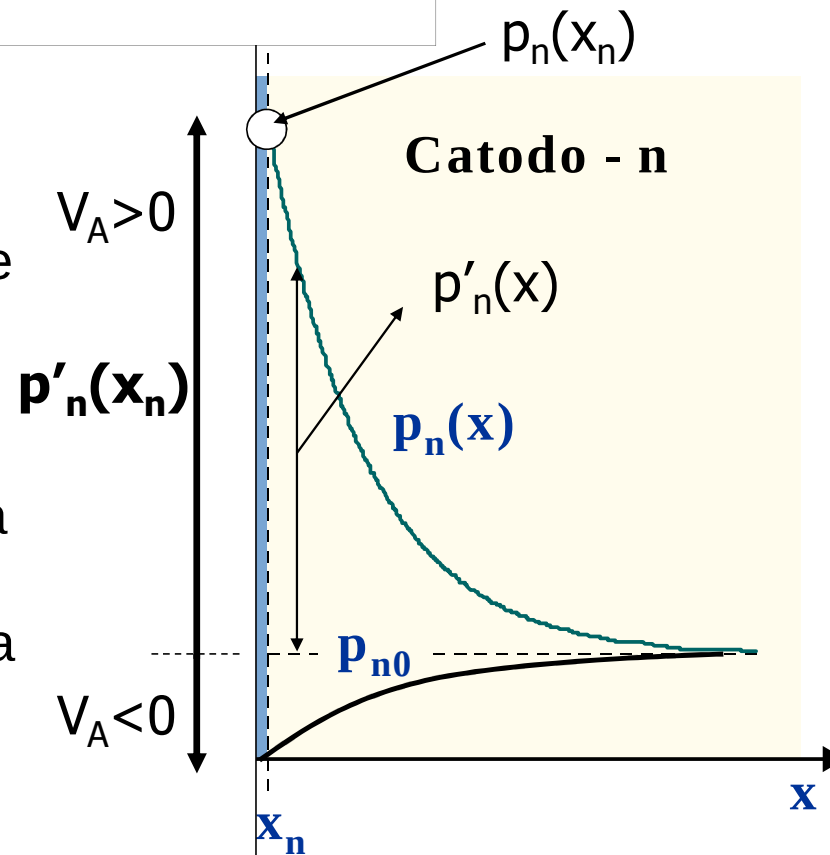
$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} \quad \leftarrow \text{Lunghezza di diffusione}$$



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*

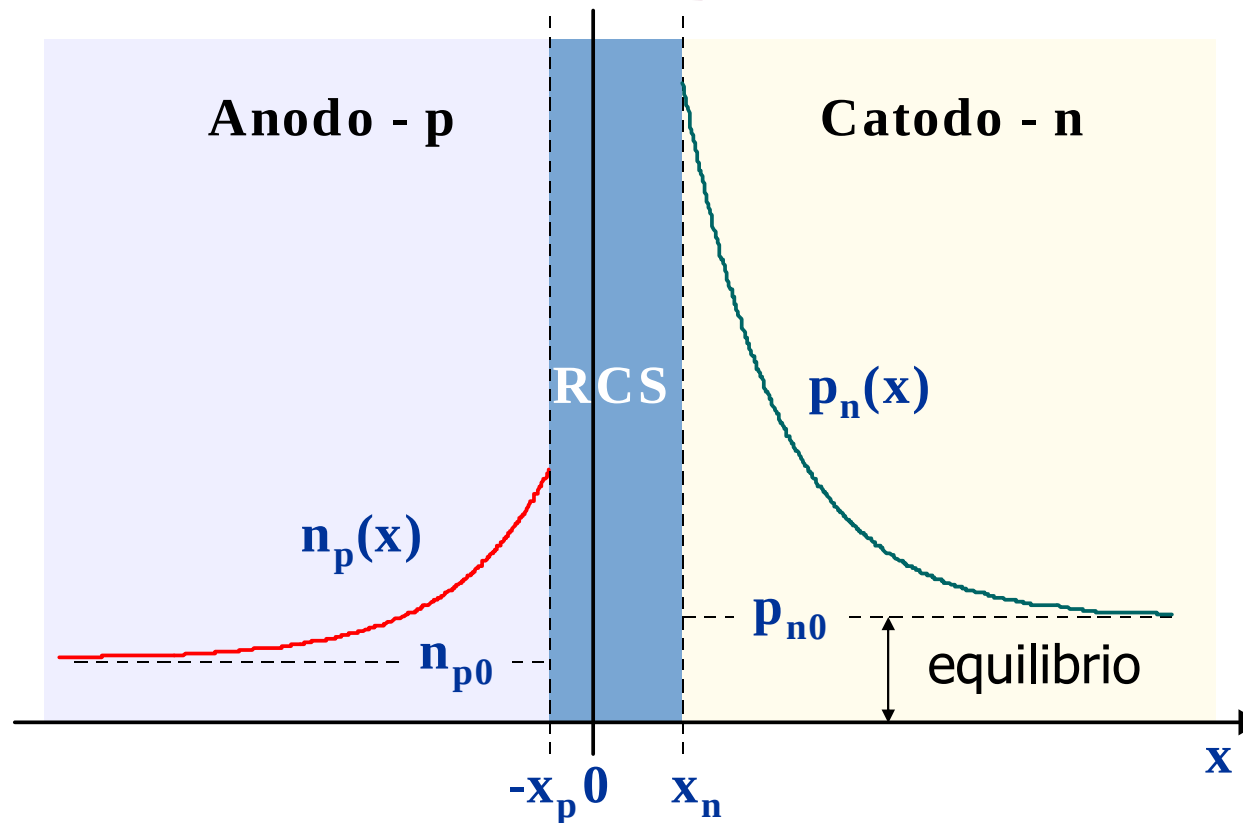
In polarizzazione diretta si crea un eccesso di portatori minoritari $p'_n(x_n)$ (rispetto alla condizione di equilibrio), in prossimità della RCS, che cresce esponenzialmente con la tensione applicata V_A :

- 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.

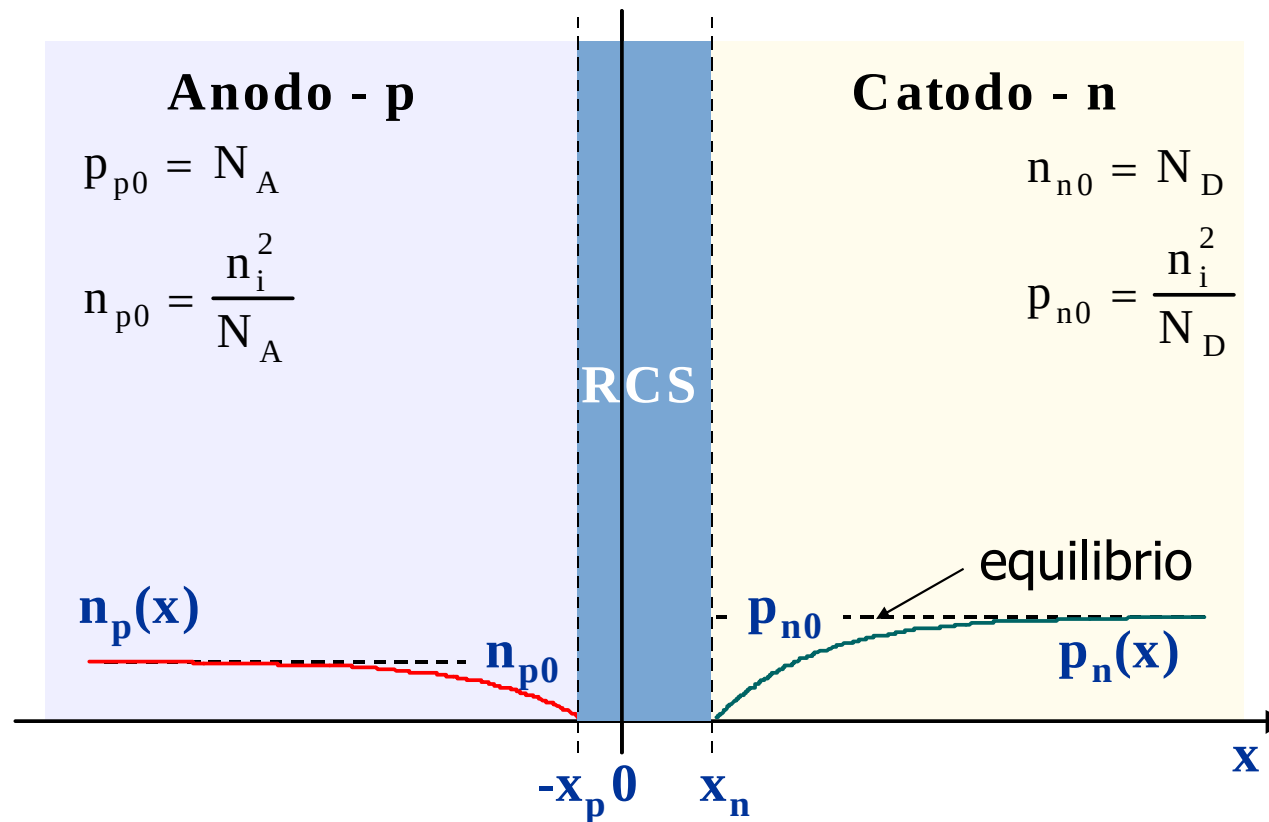
La giunzione *polarizzata* *portatori minoritari* ($N_A > N_D$) *Polarizzazione diretta, $V_A > 0$*

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 $x > x_n$

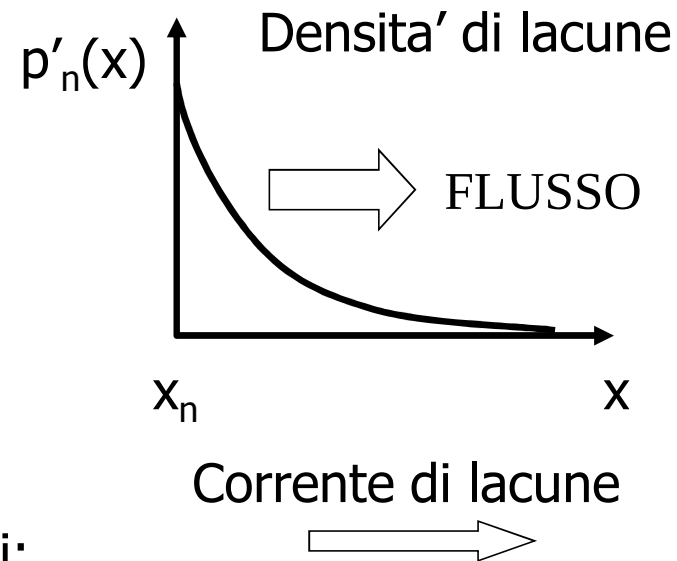
Corrente di diffusione:

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

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 $x > x_n$

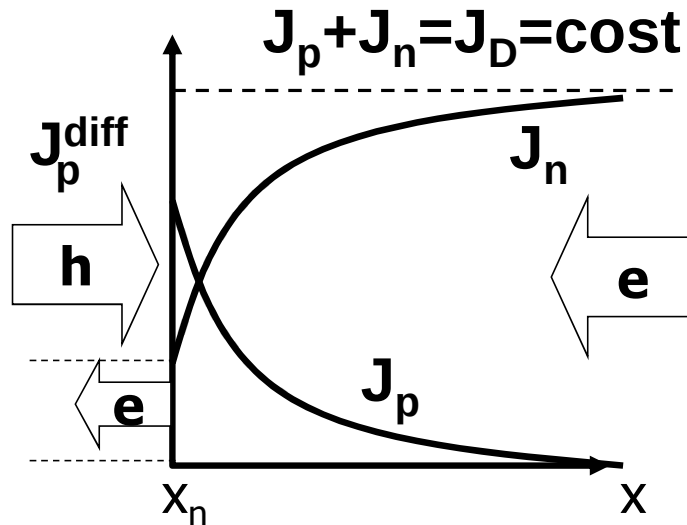


J_p e' massima in $x=x_n$ e poi decade in modo esponenziale con lunghezza di diffusione L_p .

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.

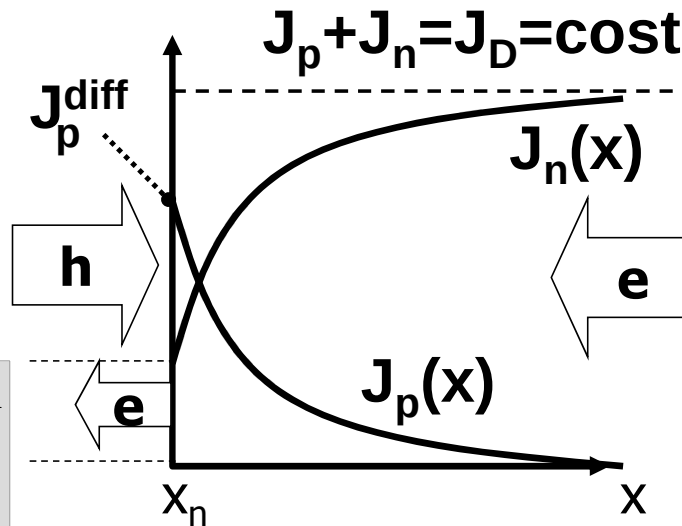
La giunzione *polarizzata*

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 $x > x_n$



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

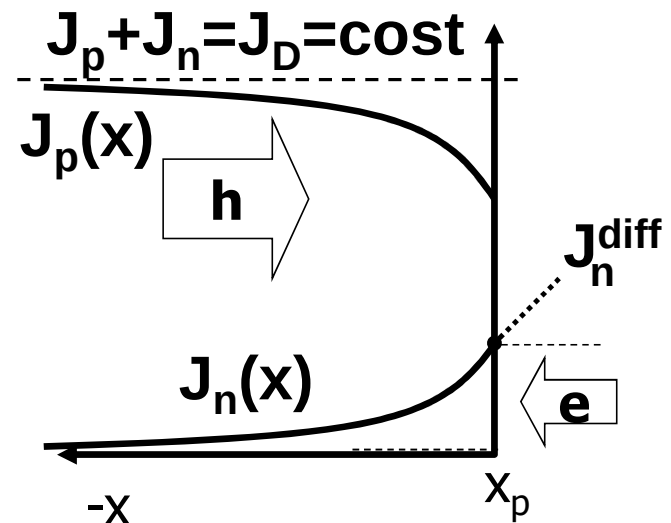
La giunzione *polarizzata*

Corrente nella giunzione pn

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

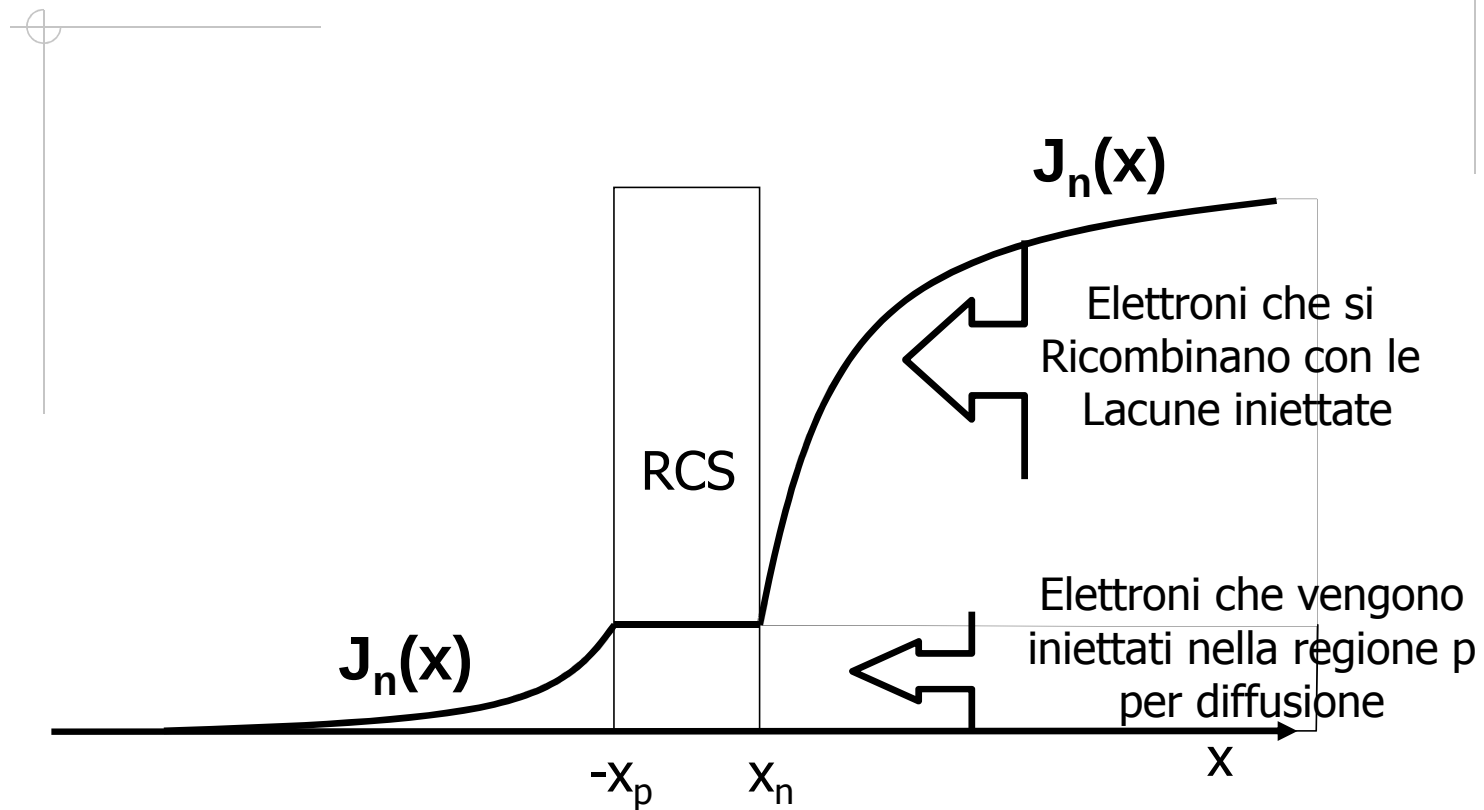
IN MODO ANALOGO NELLA ZONA P:

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



La giunzione *polarizzata*

Corrente di elettroni

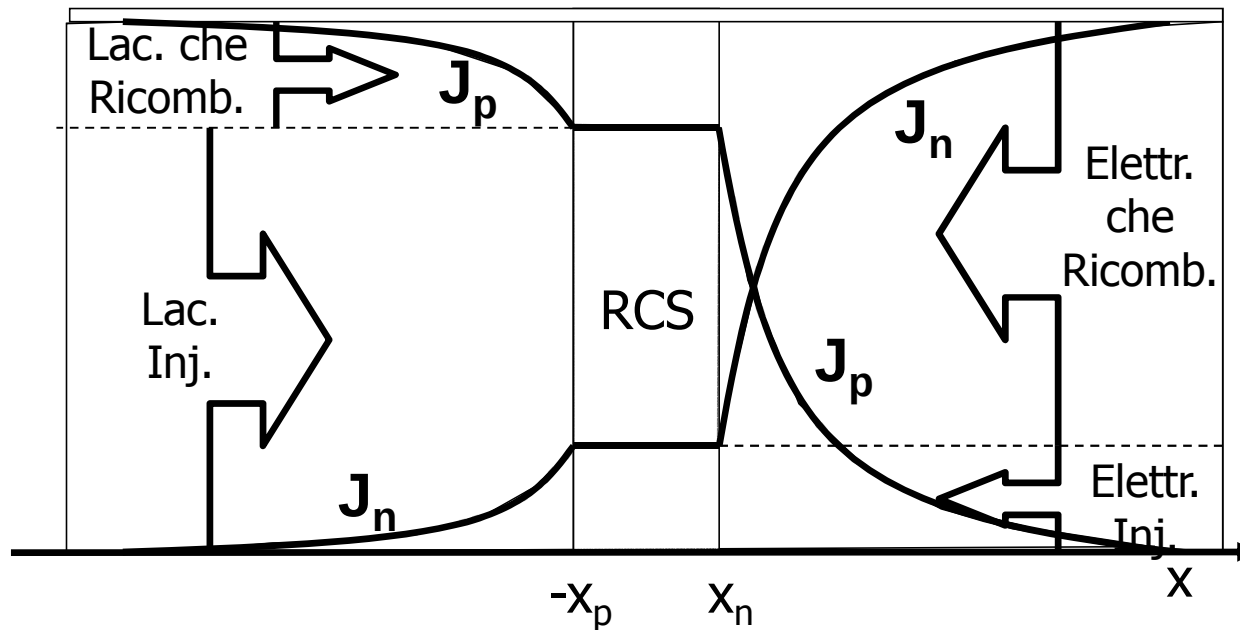


La giunzione *polarizzata*

$N_A > N_D$

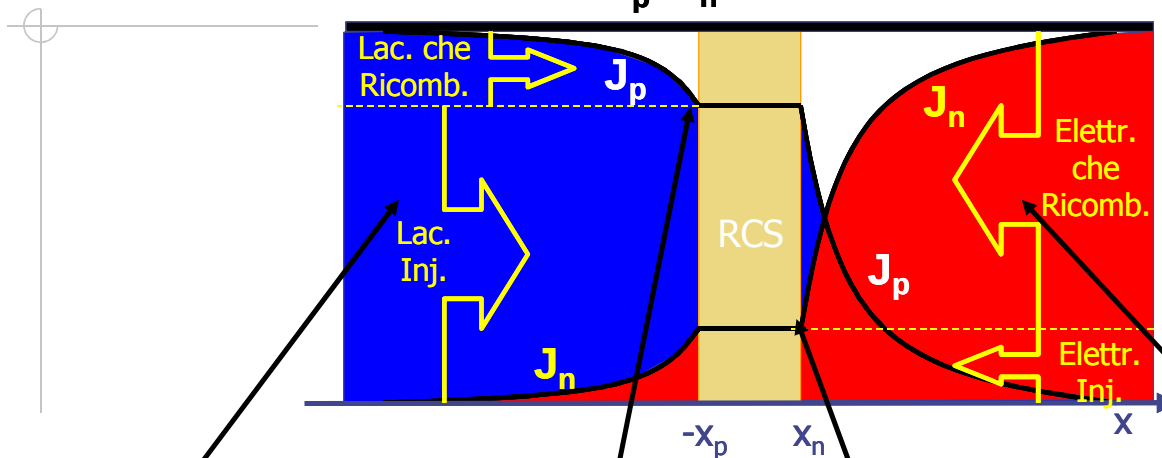
CORRENTE TOTALE

$$J_p + J_n = \text{cost}$$



La giunzione *polarizzata*

$$N_A > N_D$$
$$J_p + J_n = \text{cost}$$

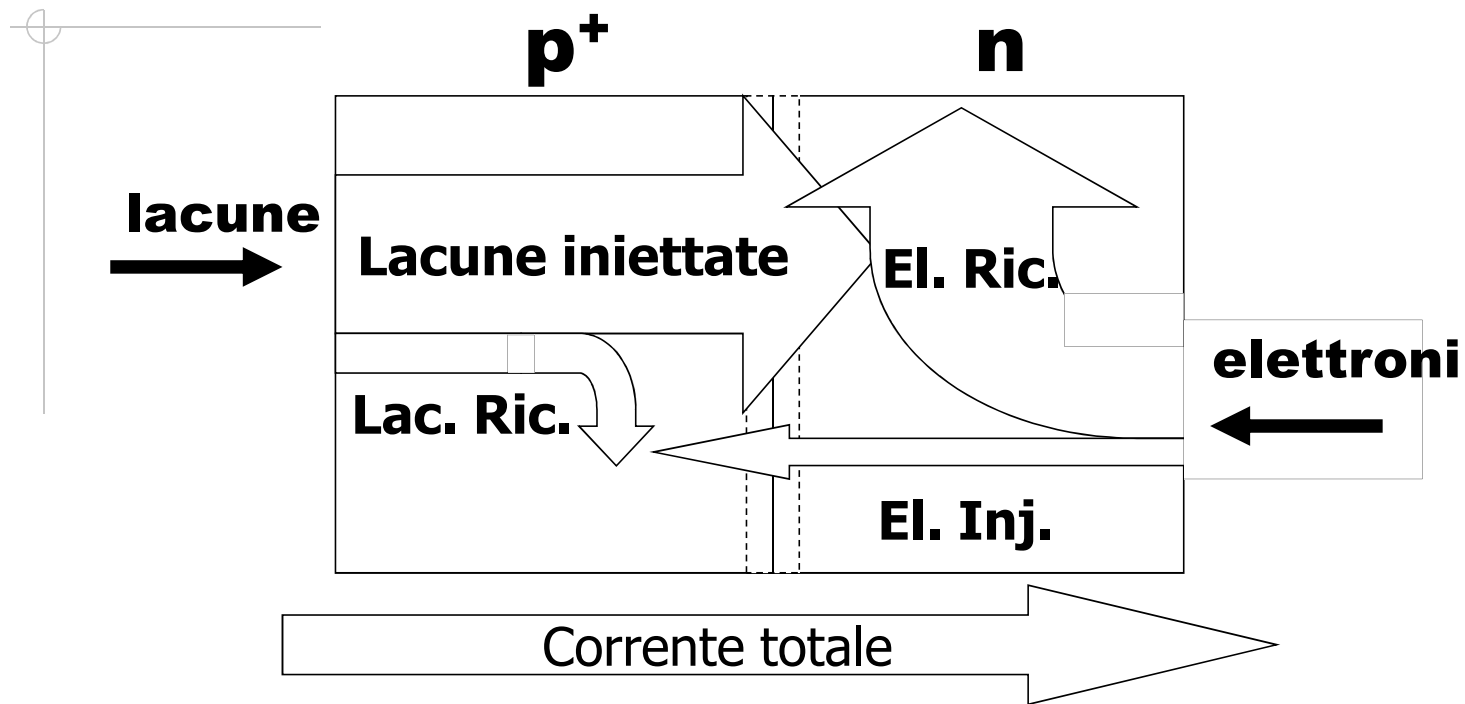


Lontano dalla
giunzione,
nella regione "p",
ho corrente di
sole lacune

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

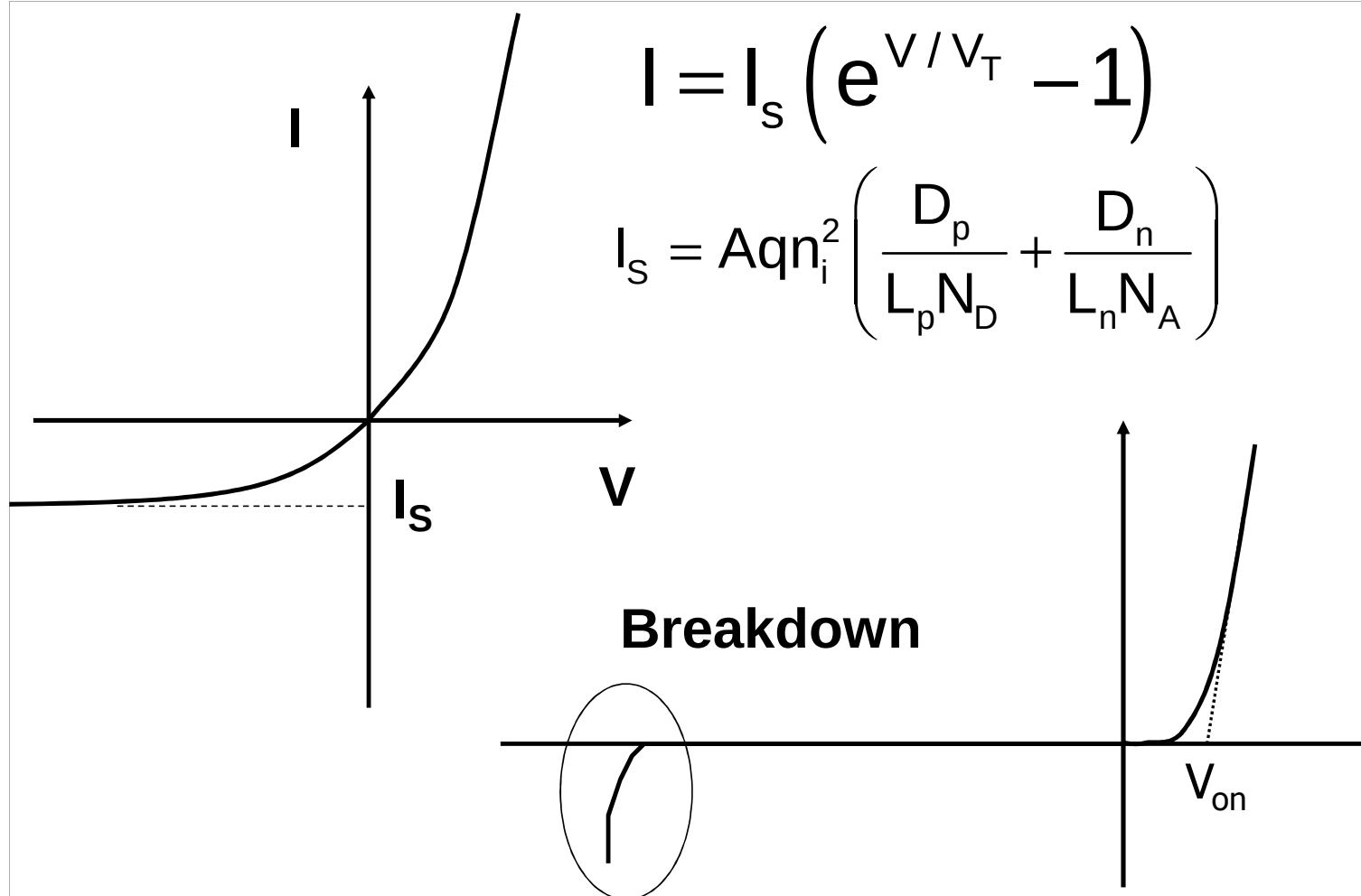
$$I = A \left[J_p(x_n) + J_n(-x_p) \right]$$

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

E ricordando che $p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}$ $n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A}$

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

Caratteristica I-V della giunzione PN



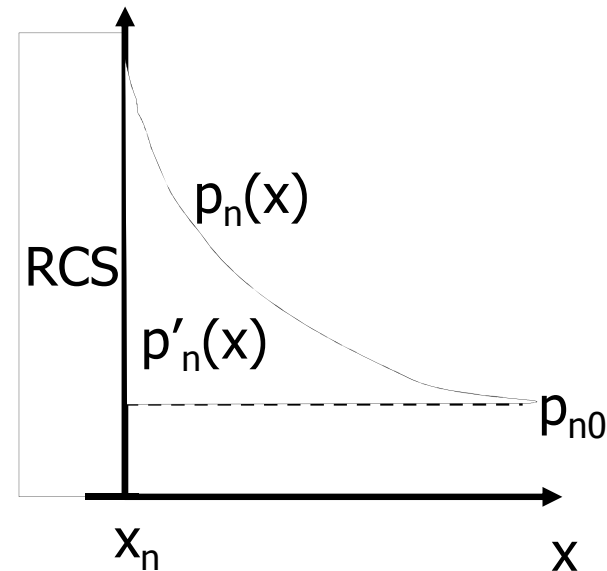
Capacità di diffusione nei diodi (Polarizzazione diretta)

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

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

Analogamente: $Q_n = I_n \tau_n$

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



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

**Capacità di
DIFFUSIONE**