Dispositivi elettronici:

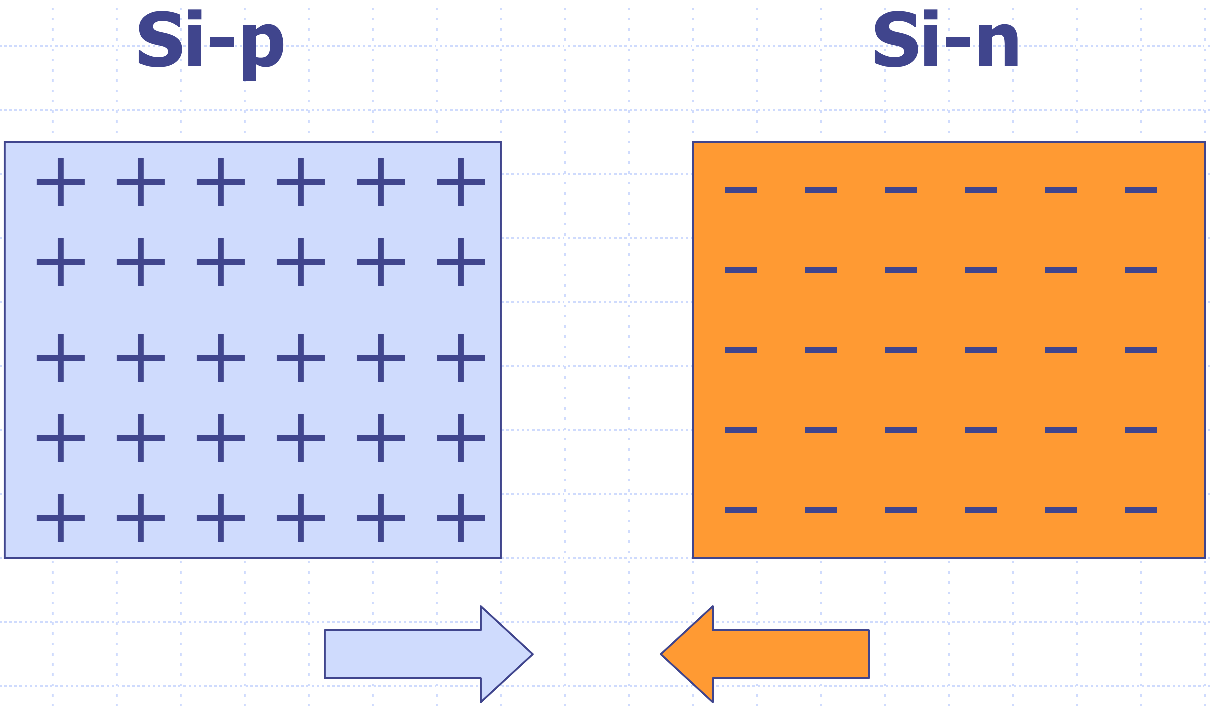
La giunzione pn

La giunzione *pn* (3.3.2-5)

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

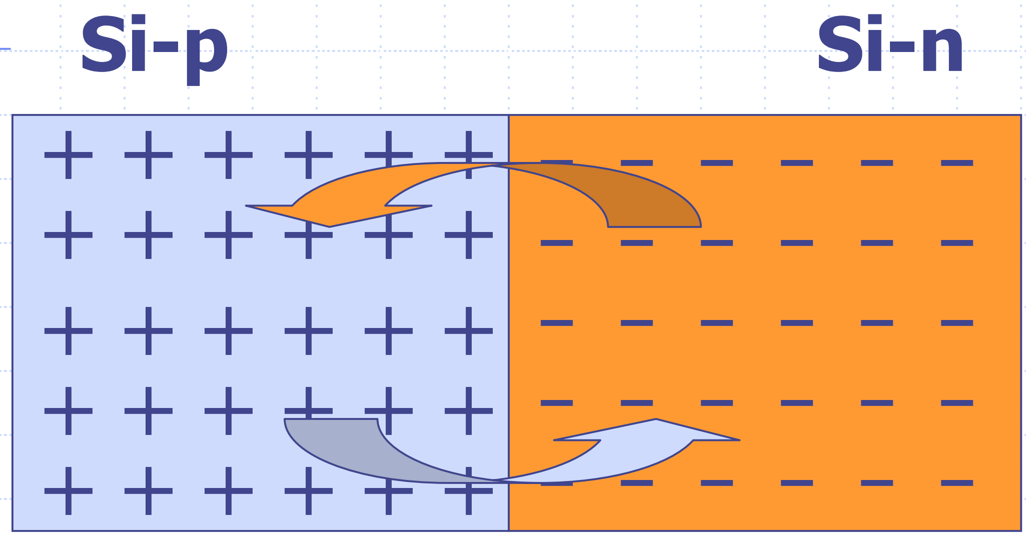
La giunzione *pn*



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*

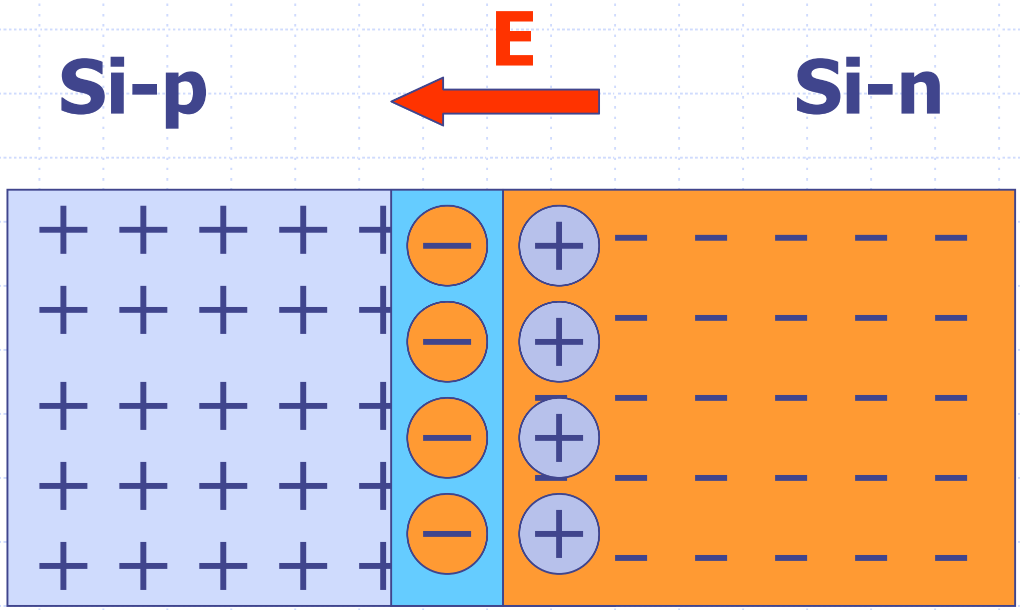


Se mettiamo a contatto Silicio drogato di tipo p con Silicio drogato tipo n, a causa dei grandi gradienti di concentrazione avremo **diffusione**:

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*

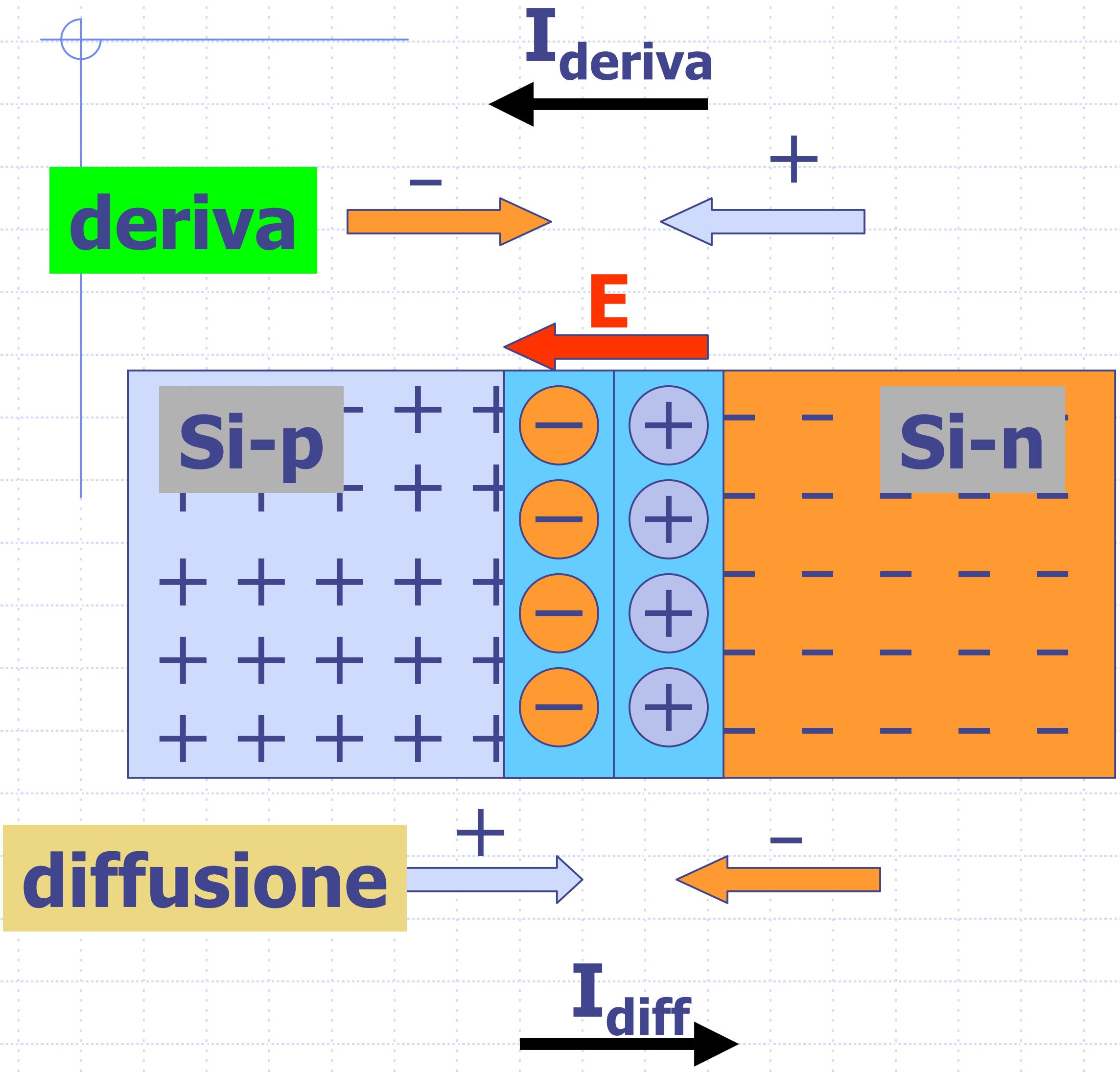


<u>Cosa frena la diffusione?</u>

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

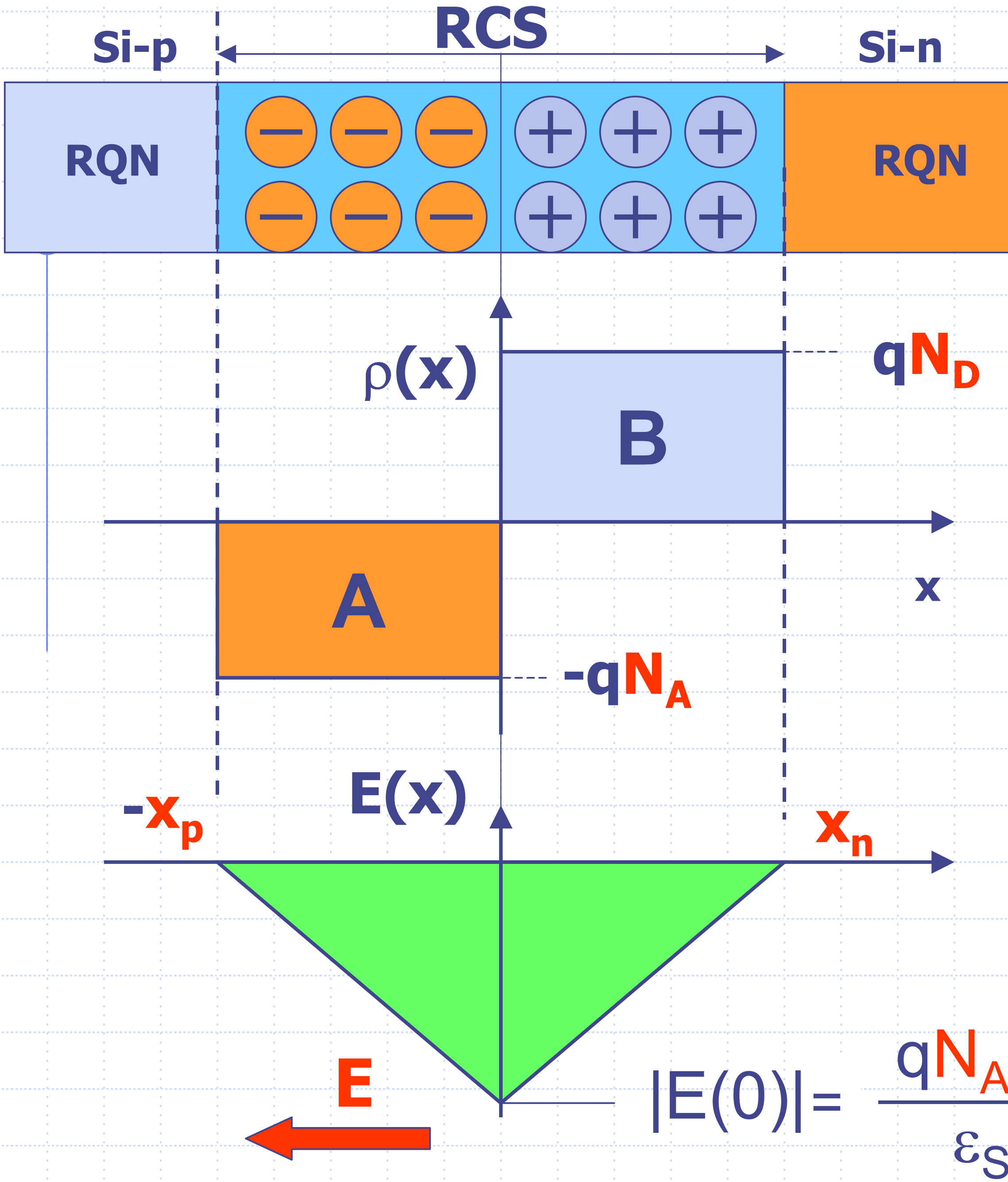
Ipotesi di svuotamento completo “a gradino”:
l’interfaccia della giunzione risulta completamente svuotata di portatori mobili.

La giunzione *pn* all'equilibrio



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

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



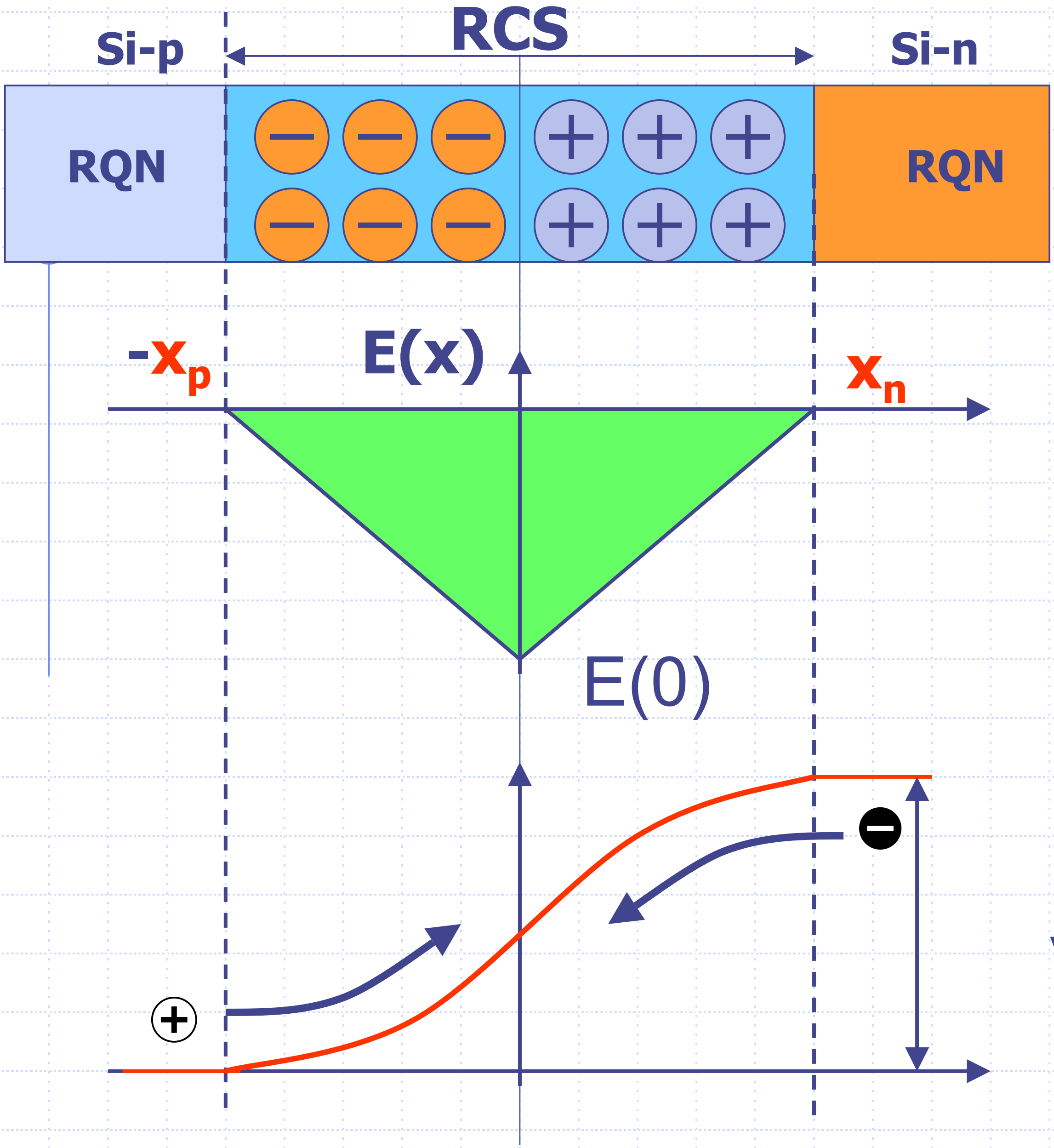
$$|E(0)| = \frac{qN_A x_p}{\varepsilon_{Si}} = \frac{qN_D x_n}{\varepsilon_{Si}}$$

RQN = Regioni Quasi Neutre

RCS = Regione di Carica Spaziale o di Svuotamento

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

$$\frac{\delta E}{\delta x} = \frac{\rho}{\varepsilon_{Si}}$$



Usando l'eq. di Poisson:

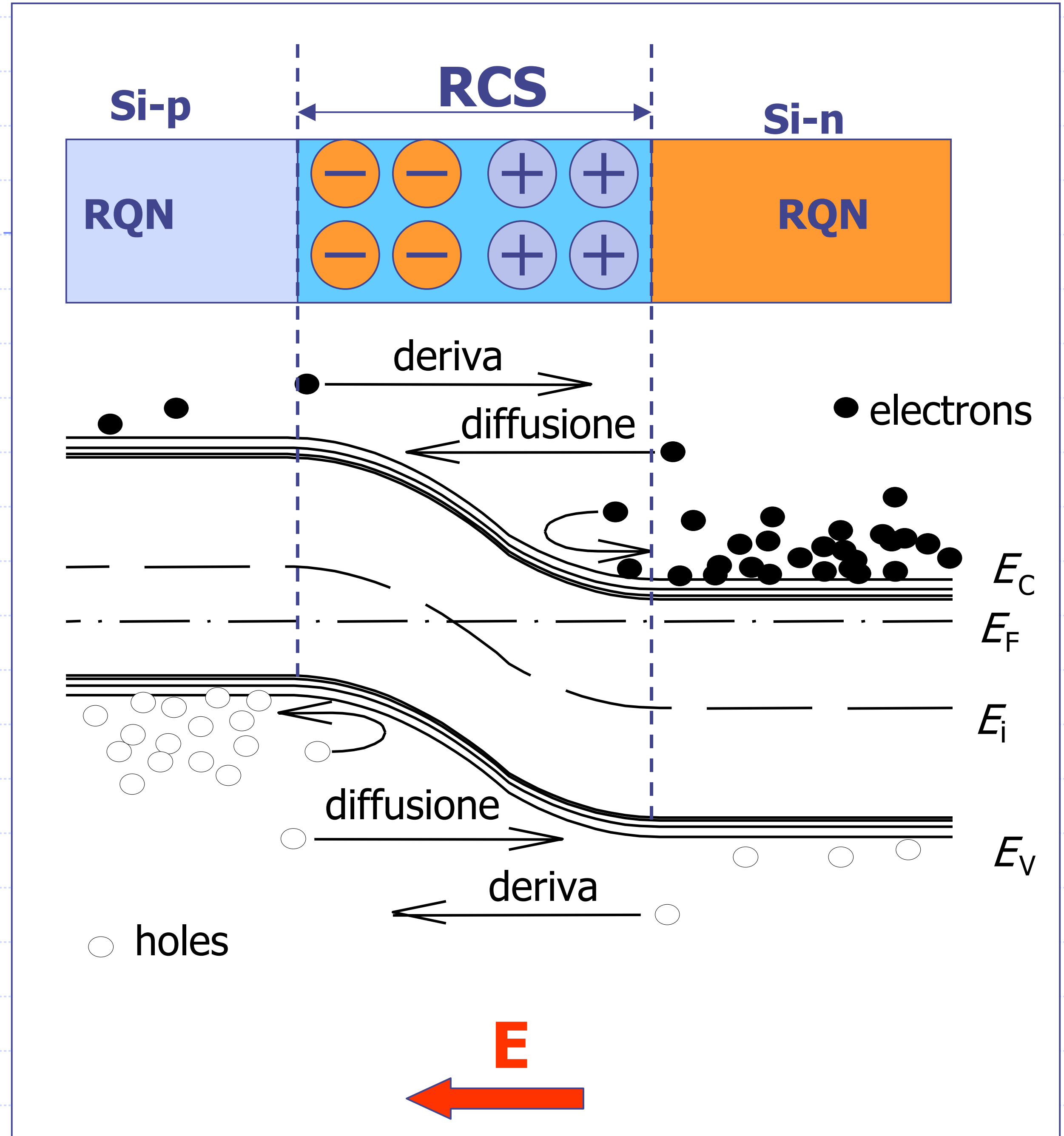
$$\frac{\delta\phi}{\delta x} = -E(x)$$

Barriera di potenziale V_0

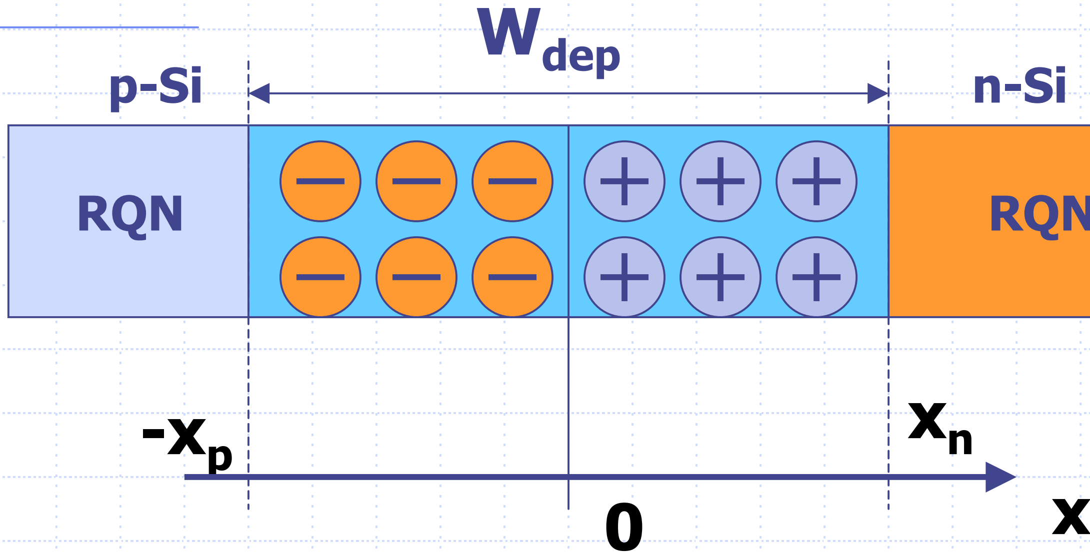
$$V_0 = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_D N_A}{n_i^2}\right)$$

V_0 = area sottesa dal campo elettrico= $\mathbf{V_0} = \dfrac{|\mathbf{E(0)}|(\mathbf{x_n} + \mathbf{x_p})}{\mathbf{2}}$

La giunzione *pn* all'equilibrio



Giunzione *pn*, *regione di svuotamento*



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

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

$\varepsilon_s = 1.04\ 10^{-12}$ 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)

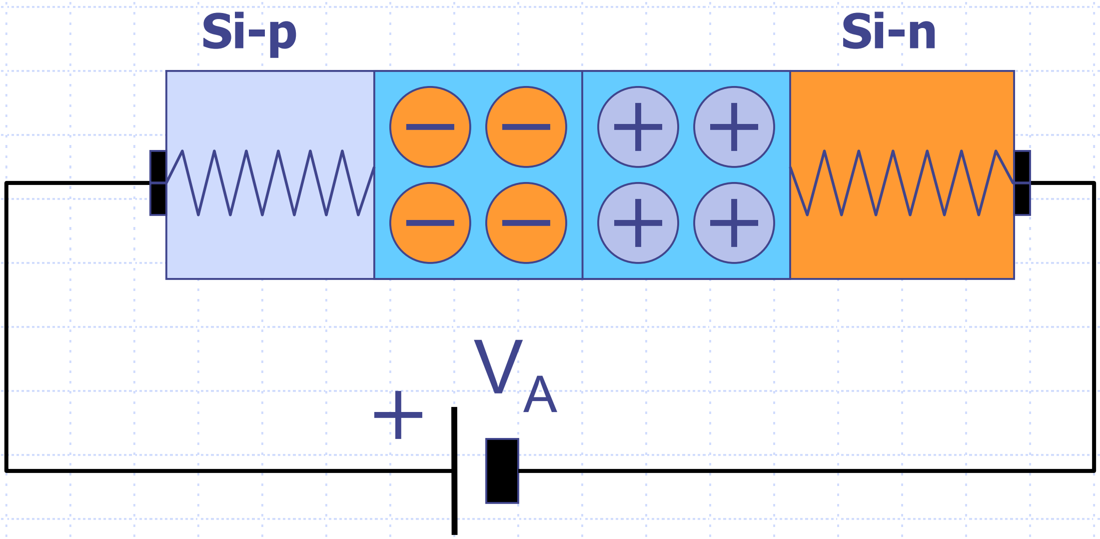
Se $N_A << N_D$, allora $x_p >> x_n$
(la regione di svuotamento si estende quasi interamente nella regione p)

Giunzione *pn* *polarizzata*

Ipotesi semplificative:

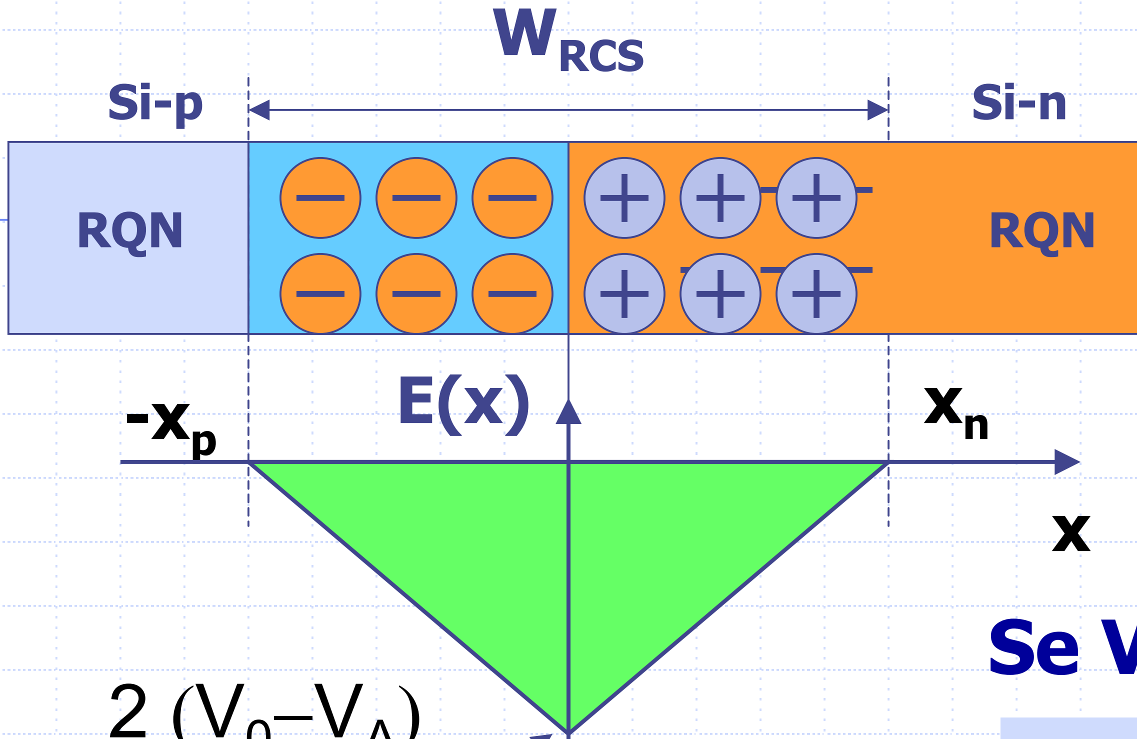
- Approssimazione di svuotamento
- Cadute di tensione trascurabili sui contatti e RQN
- Deboli correnti (bassa iniezione)

La tensione applicata cade tutta alla giunzione



$$V_0 \Leftrightarrow V_0 - V_A$$

Nota: positivo a p
negativo a n



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

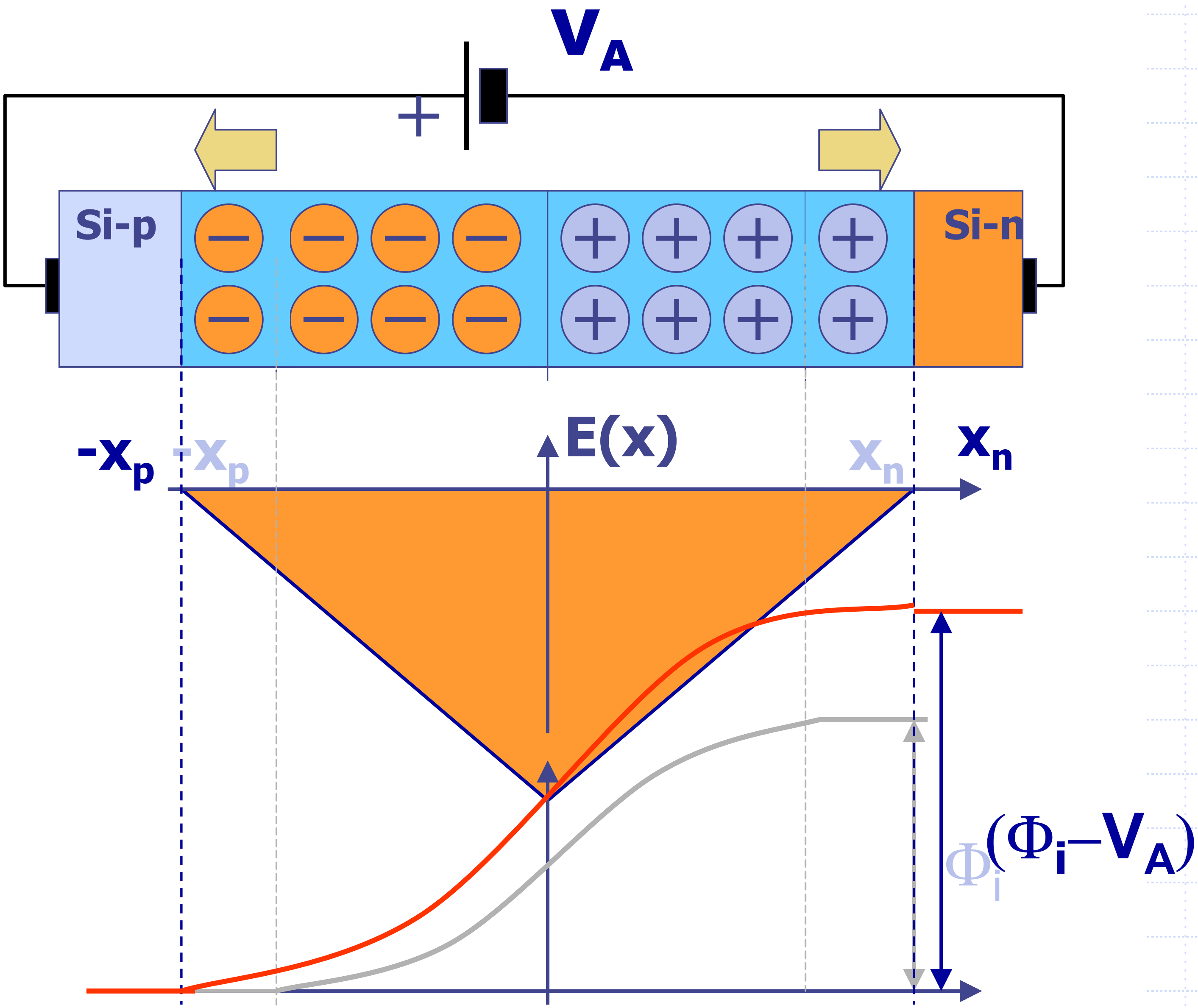
Se V_A aumenta:

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

e viceversa

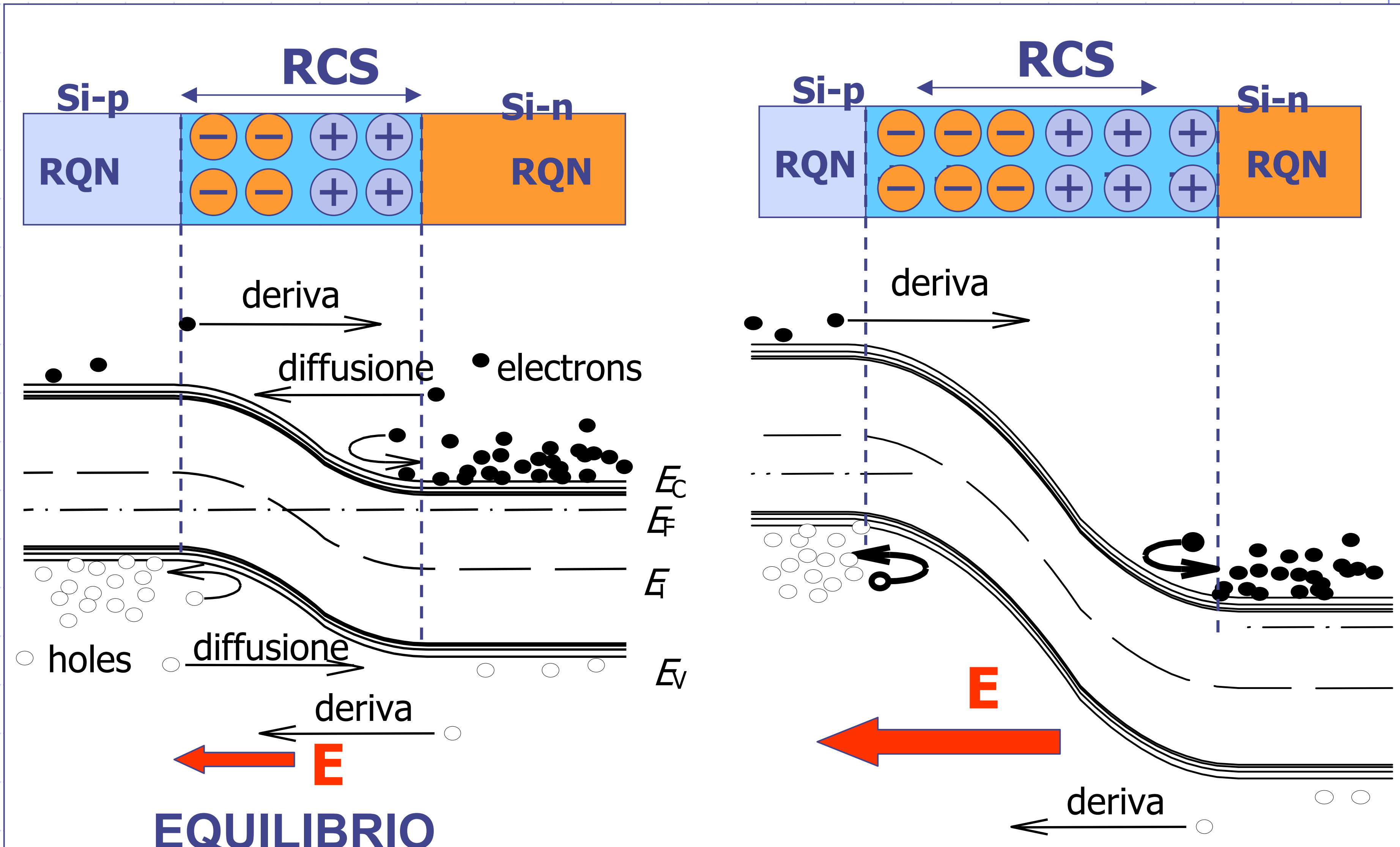
$$W_{dep} = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_0 - V_A)}$$

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)

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

$$V_R = -V_A$$

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

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

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

Capacita' parassite nei diodi (Polarizzazione inversa)

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

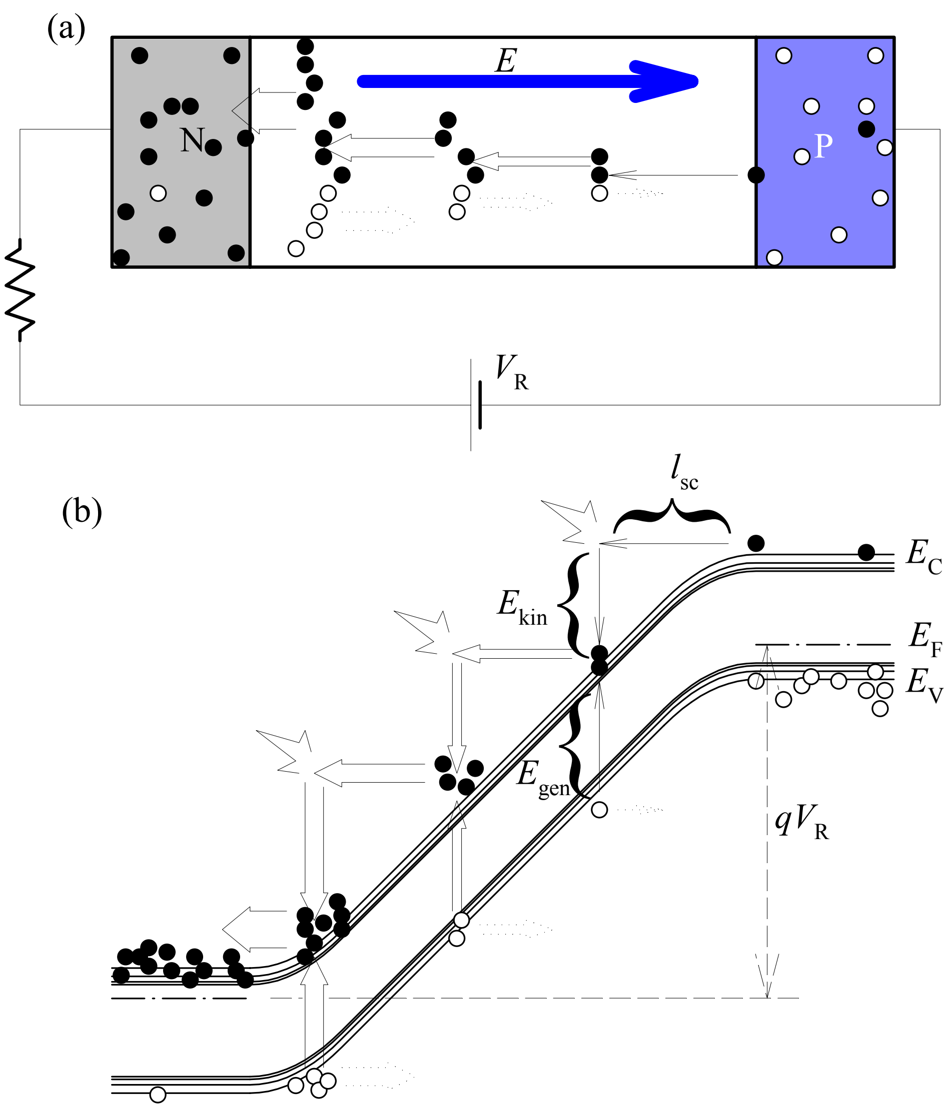
$$C_j = \left.\frac{\partial Q}{\partial V_R}\right|_{V_R = V_Q}$$

Con alcuni passaggi algebrici si ottiene:

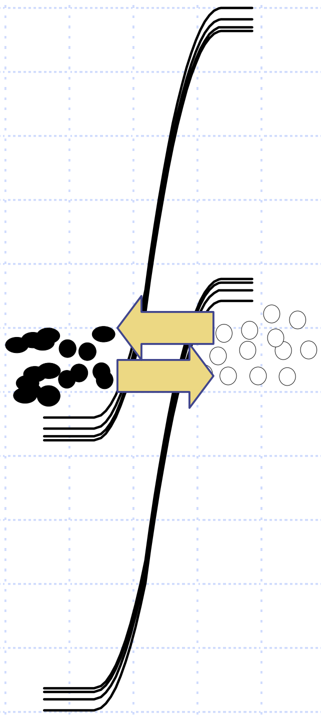
$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1+\frac{V_R}{V_0}}}; \quad C_{j0} = A\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_S q}{2}\right)\left(\frac{N_D N_A}{N_D + N_A}\right)\left(\frac{1}{V_0}\right)}$$

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

Breakdown Valanga

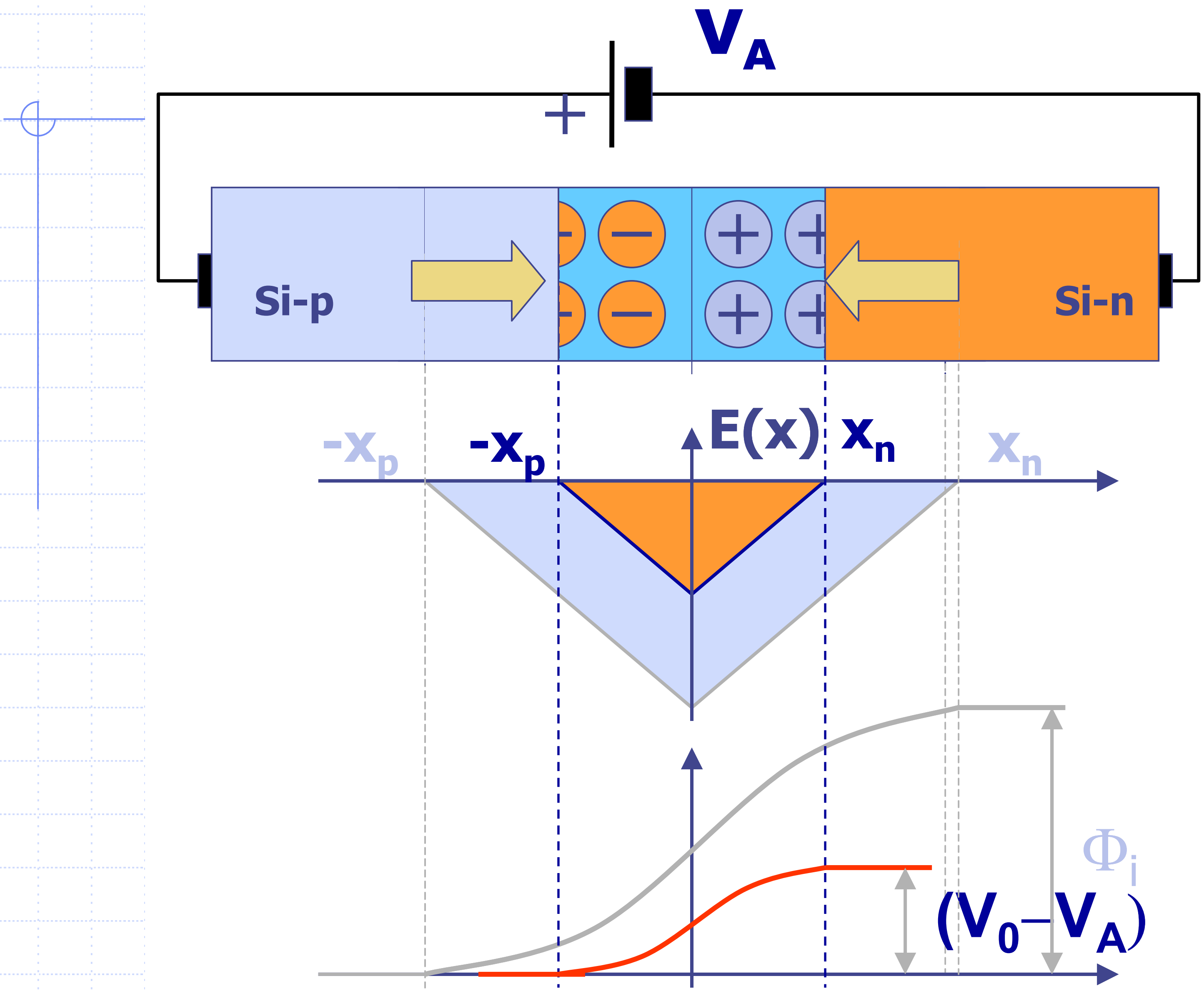


Breakdown ZENER



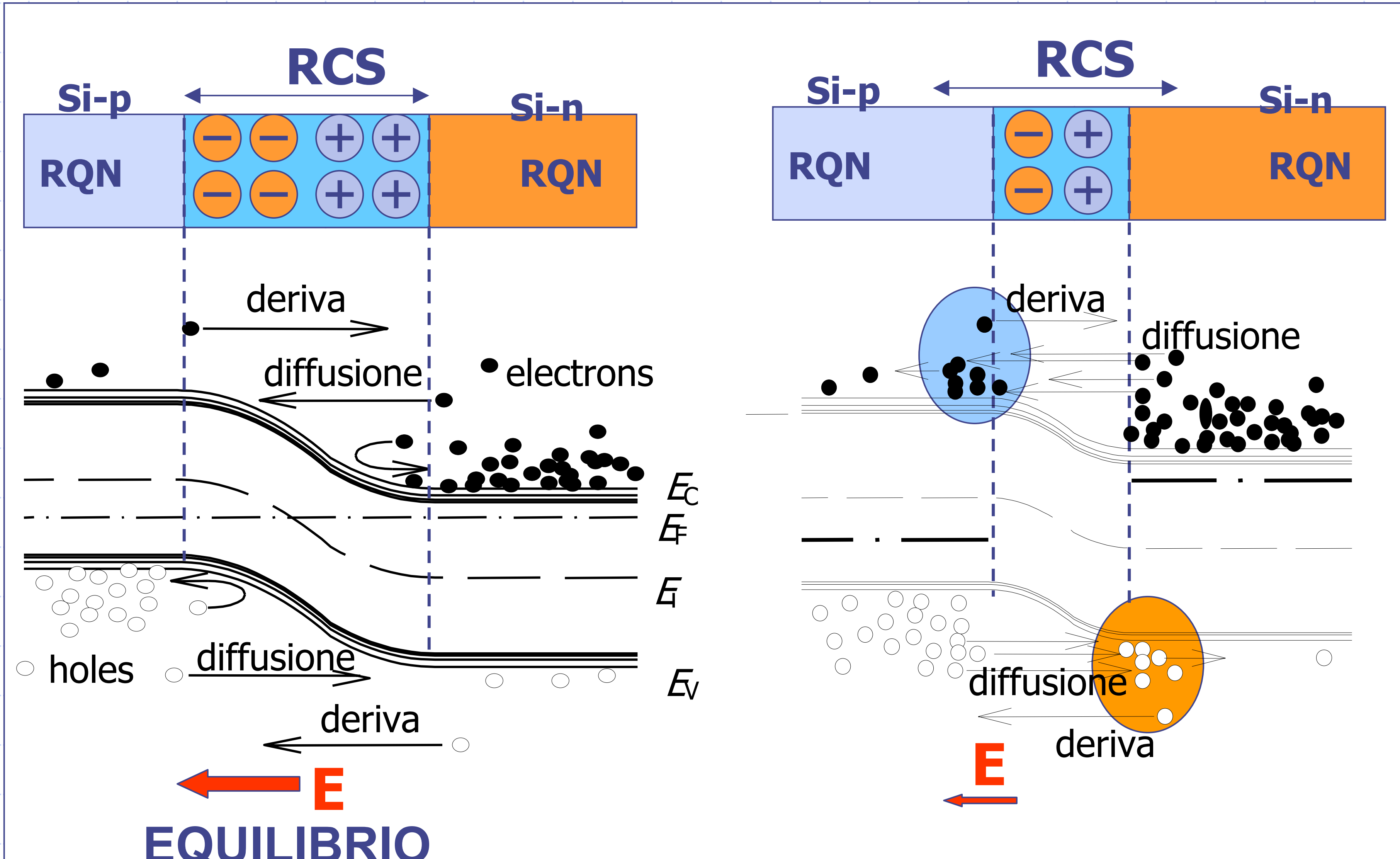
In giunzioni pesantemente drogate la RCS risulta ridotta e il
campo elettrico alla giunzione
molto elevato.
Questo causa un piegamento di bande tale da attivare l'effetto tunnel (il campo E rompe i legami covalenti)

La giunzione *polarizzata diretta* $(V_A>0)$



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

movimento dei portatori liberi



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

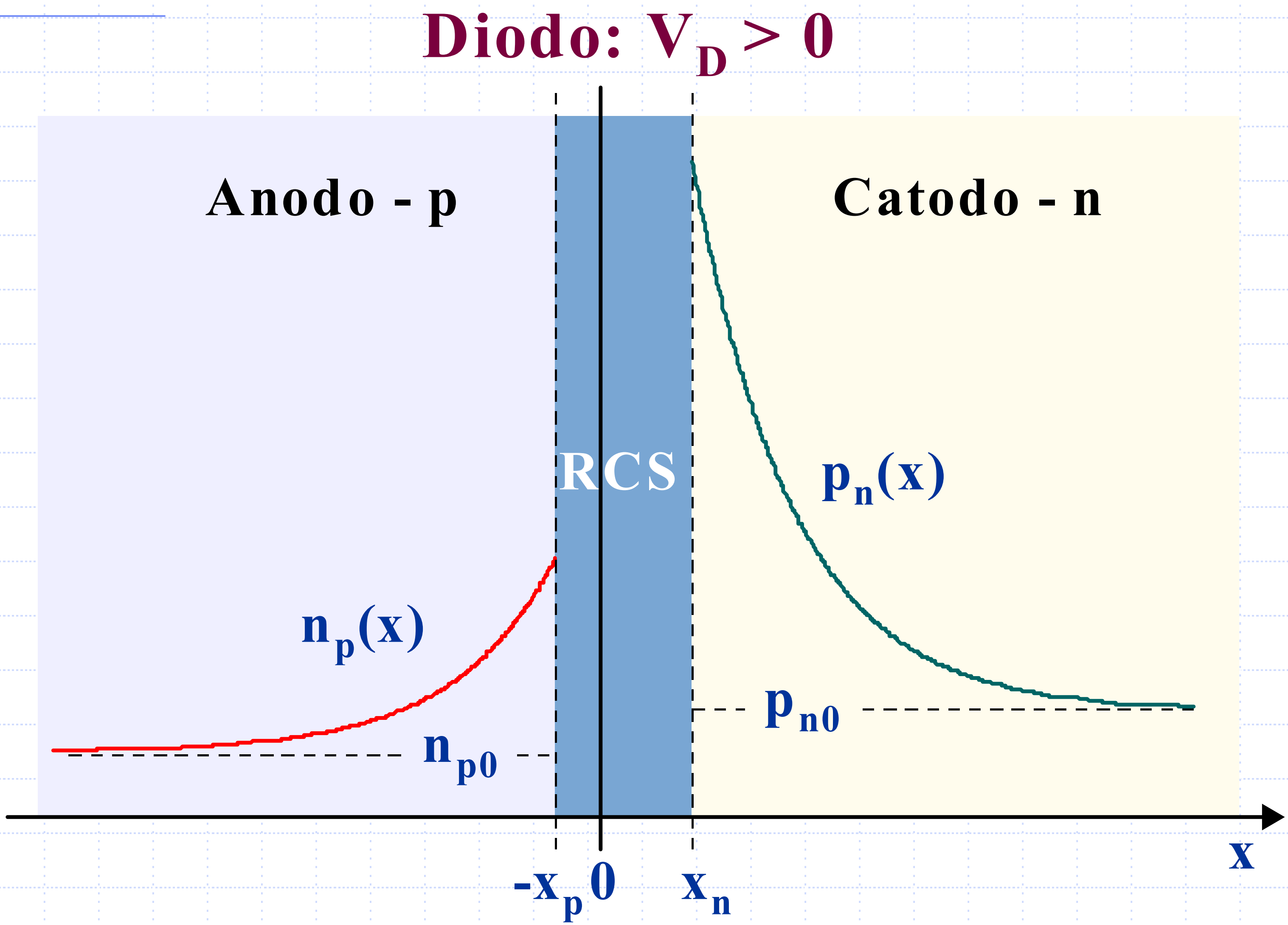
movimento dei portatori liberi

In polarizzazione diretta si crea un eccesso di portatori minoritari (rispetto alla condizione di equilibrio) in prossimità della RCS:
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 ($N_A > N_D$)



La giunzione *polarizzata*

portatori minoritari

Diodo: $V_D > 0$

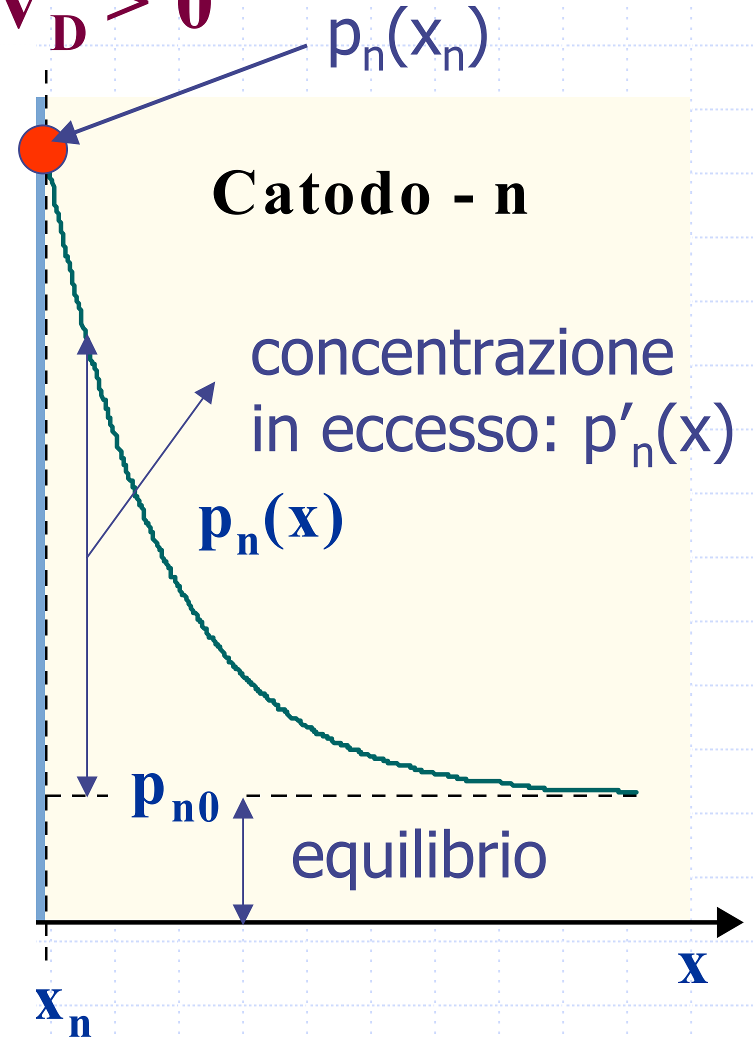
$$p_n(x) - p_{n0} = p'_n(x) =$$

$$\left[p_n(x_n) - p_{n0}\right] \; e^{-\frac{x-x_n}{L_p}}$$

$$\text{per} \quad x > x_n$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

D_p=costante di diffusione
τ_p=tempo di vita medio



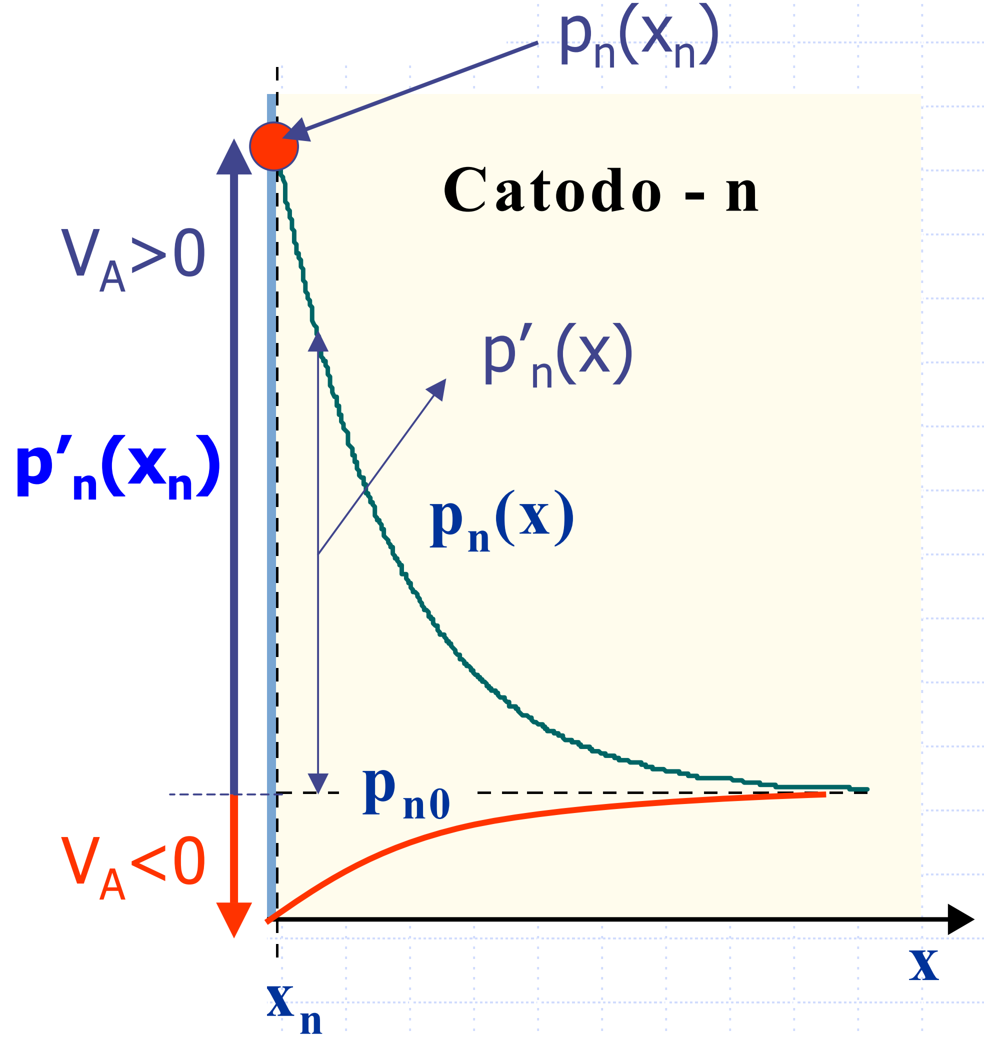
La giunzione *polarizzata*

portatori minoritari

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

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

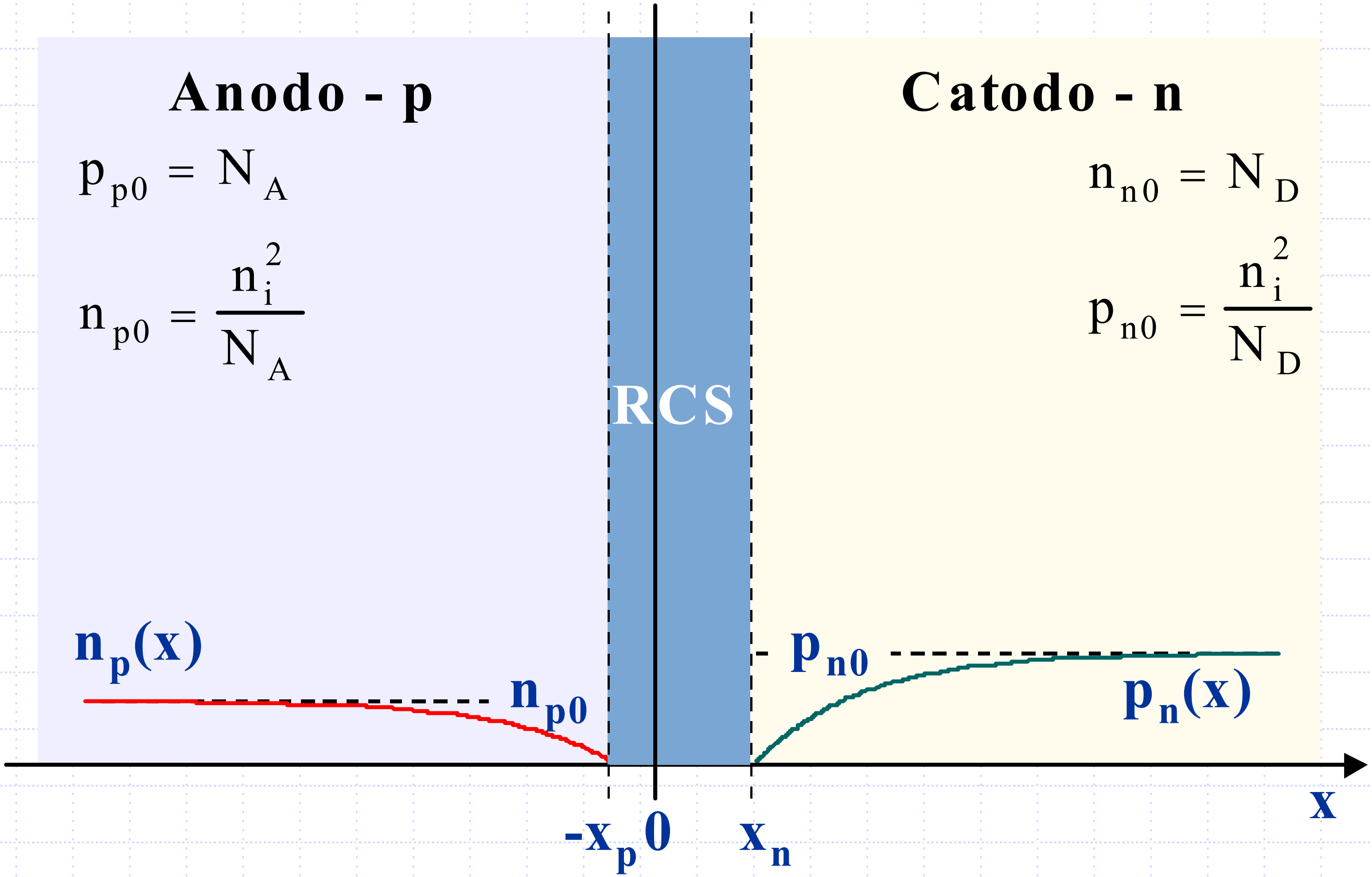
$$\text{per} \quad x > x_n$$



La giunzione *polarizzata*

portatori minoritari ($N_A > N_D$)

Diodo: $V_D < 0$

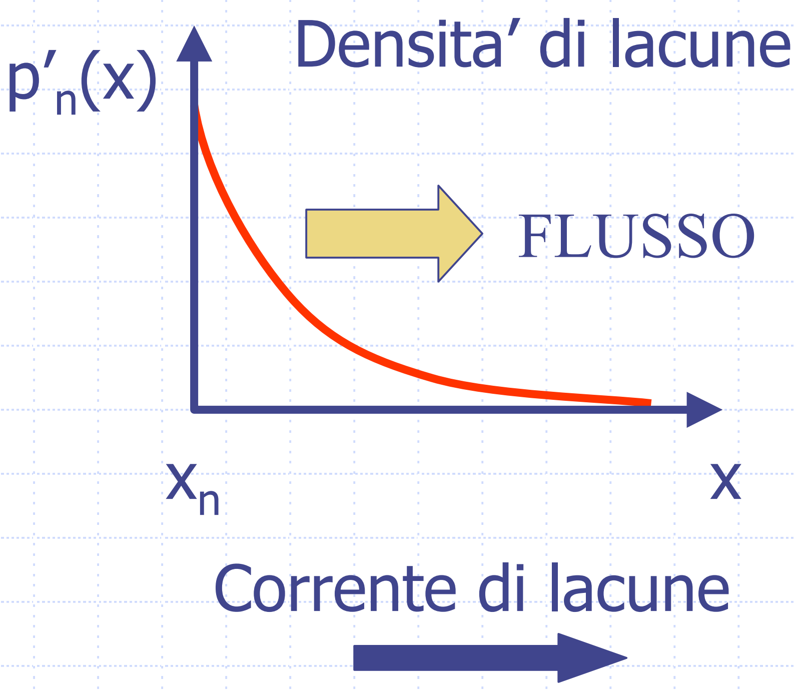


La giunzione *polarizzata*

Corrente nella giunzione pn

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

$$\text{per} \quad x > x_n$$



Corrente di diffusione:

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

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

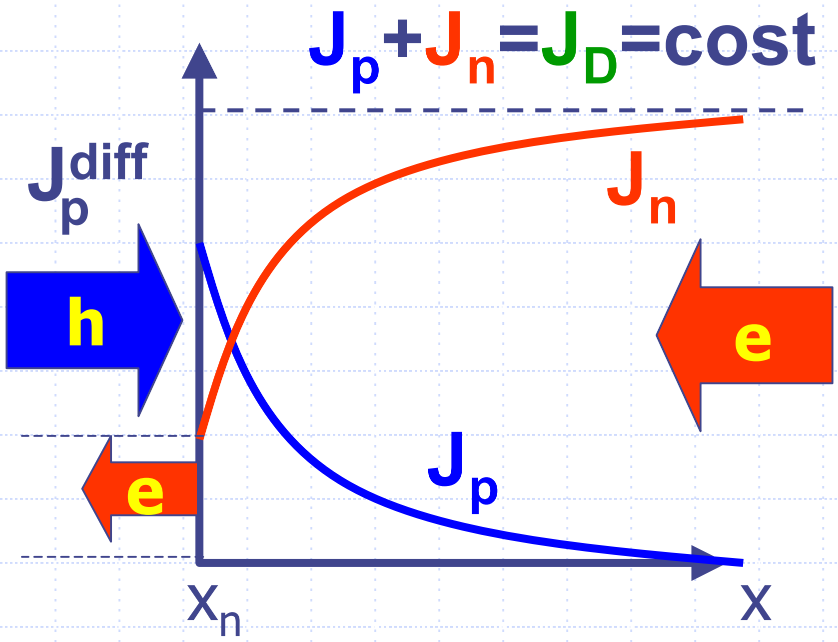
$$\text{per} \quad x > x_n$$

J_p e' massima in $x=x_n$ e poi decade in modo esponenziale.

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, $p'_n(x)=0$);

(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.

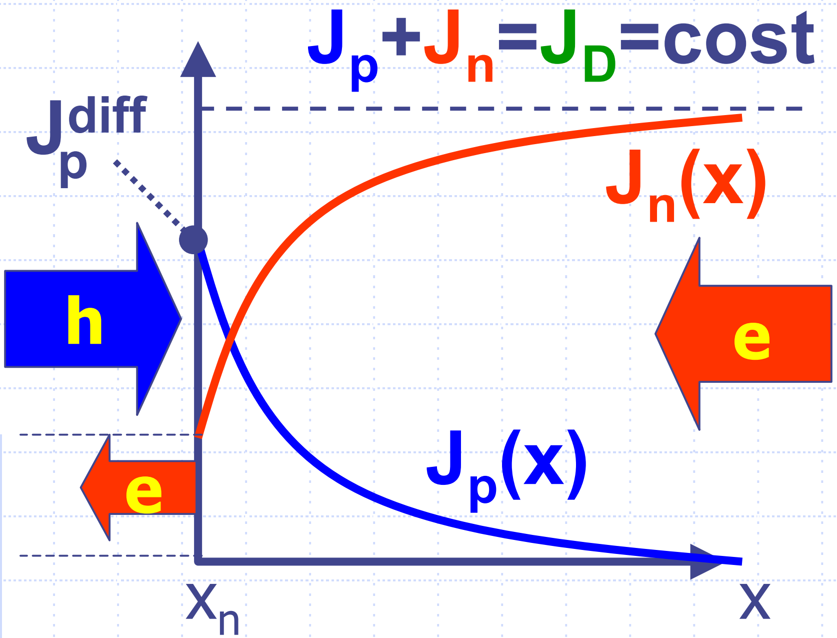
La giunzione *polarizzata*

Corrente nella giunzione pn

Consideriamo gli andamenti della corrente nella zona n

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

$$\text{per} \quad x > x_n$$



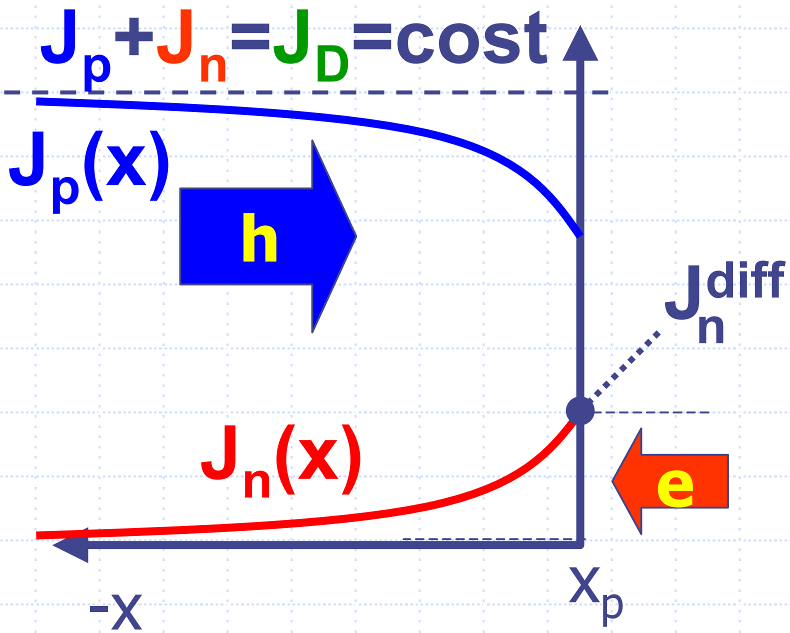
$$J_p^{diff} = J_p(x_n) = q\frac{D_p}{L_p}p_{n0}\left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1\right)$$

La giunzione *polarizzata*

Corrente nella giunzione pn

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

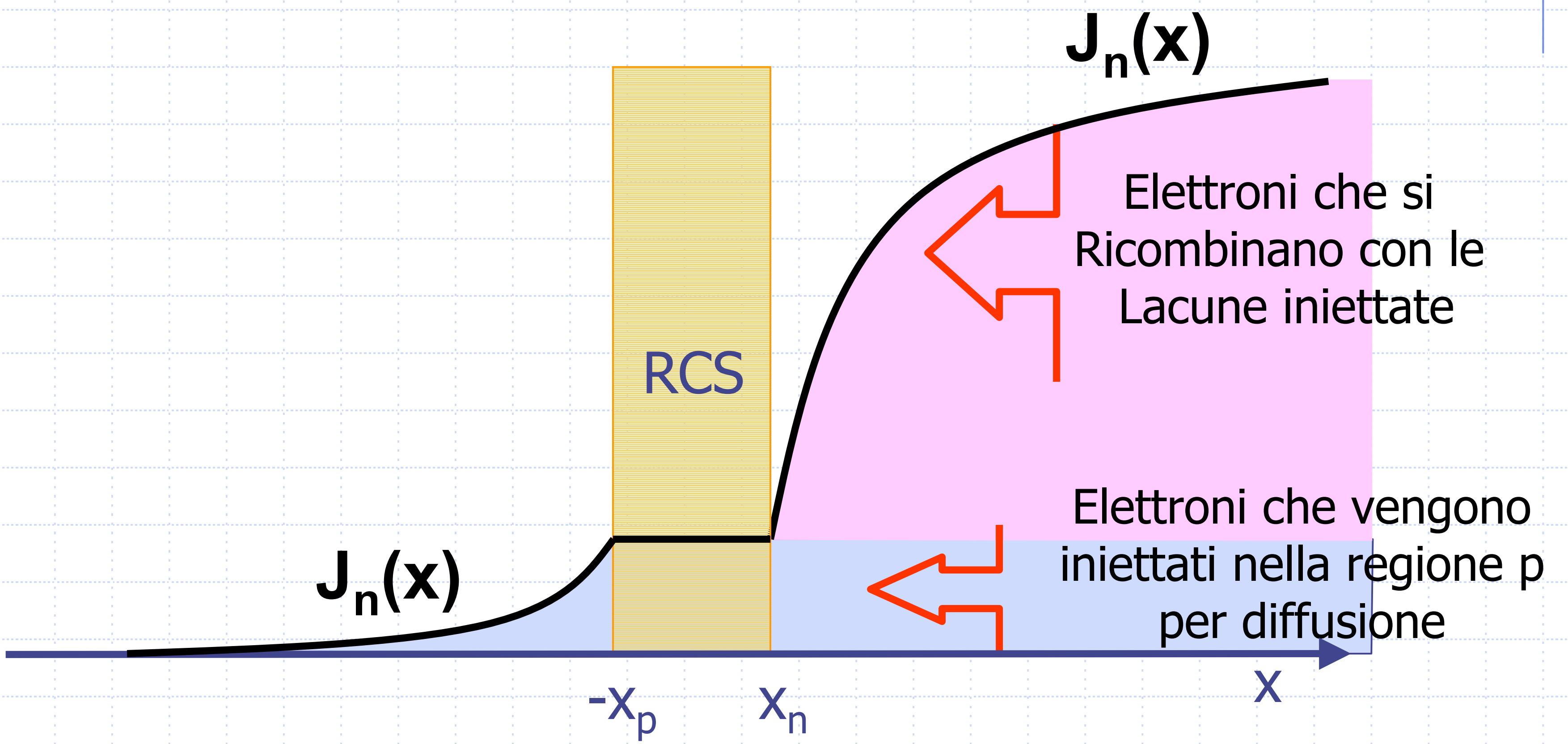
IN MODO ANALOGO NELLA ZONA P:



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

La giunzione *polarizzata*

Corrente di elettroni

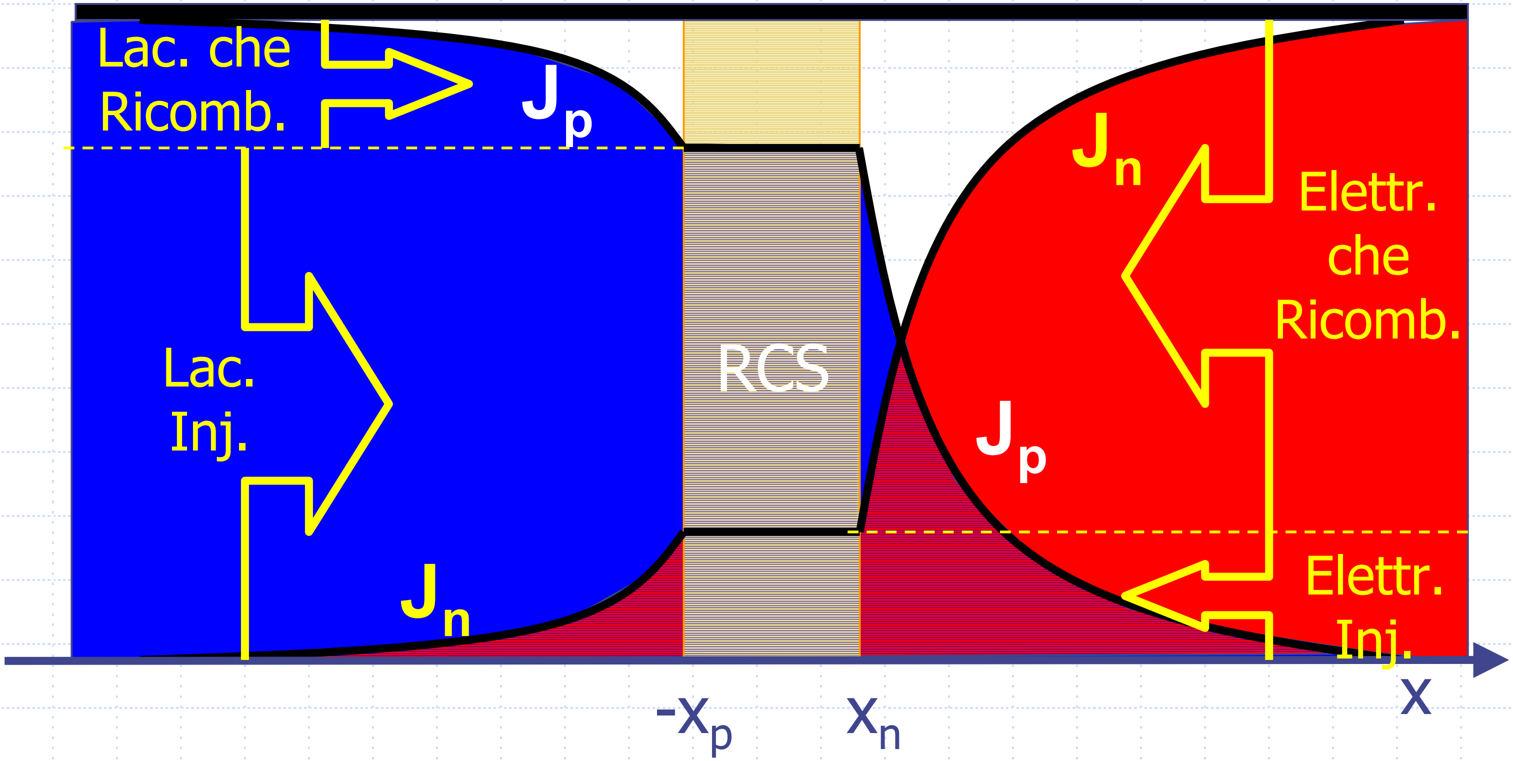


La giunzione *polarizzata*

$N_A > N_D$

CORRENTE TOTALE

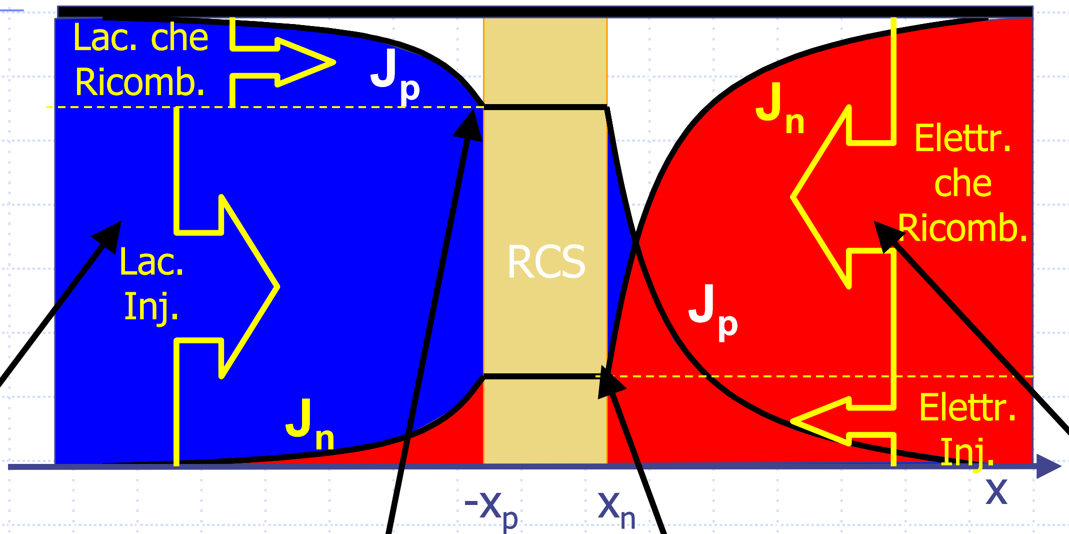
$J_p + J_n = \text{cost}$



La giunzione *polarizzata*

$N_A > N_D$

$J_p + J_n = \text{cost}$



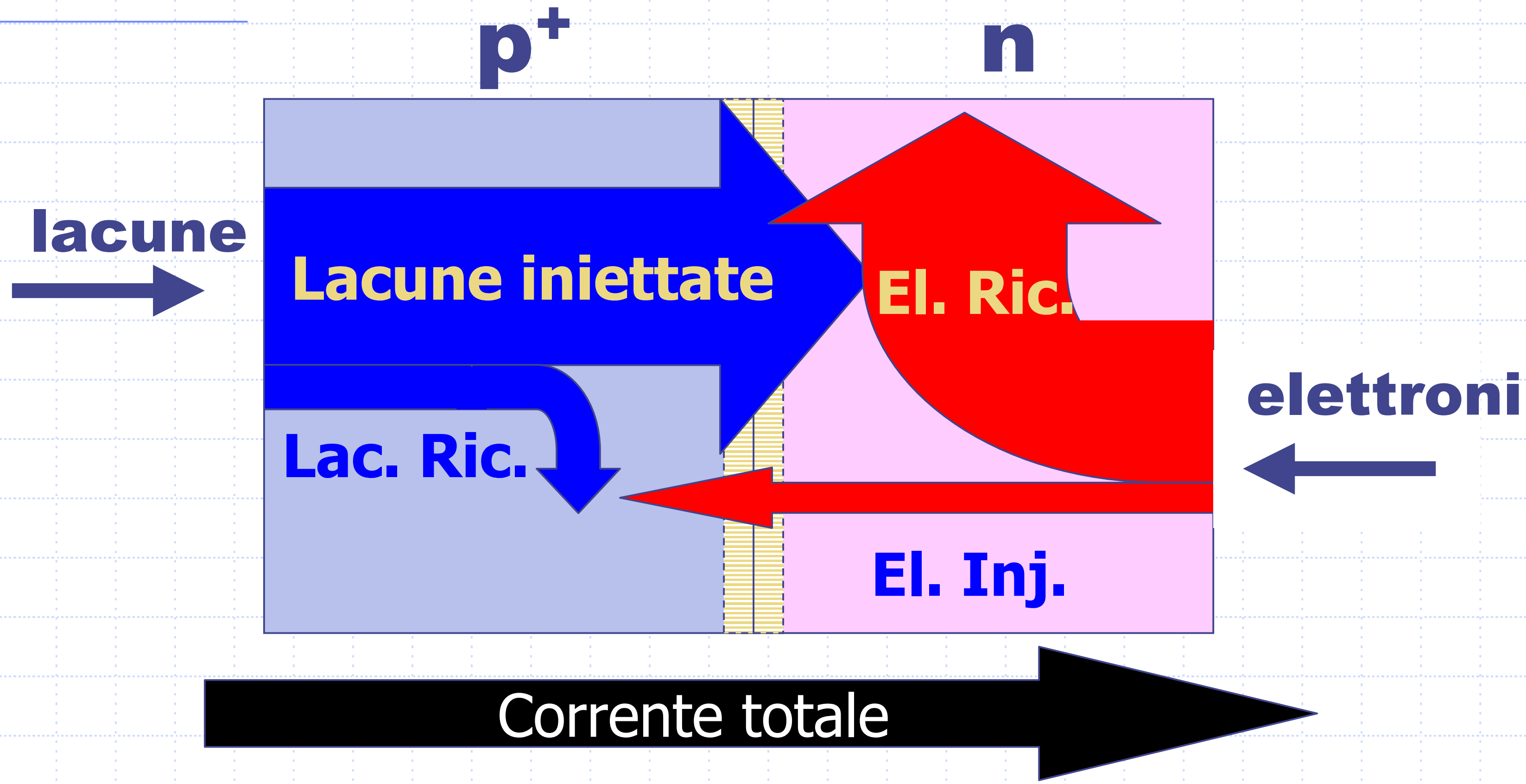
Lontano dalla giunzione, nella regione "p", ho corrente di sole lacune

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

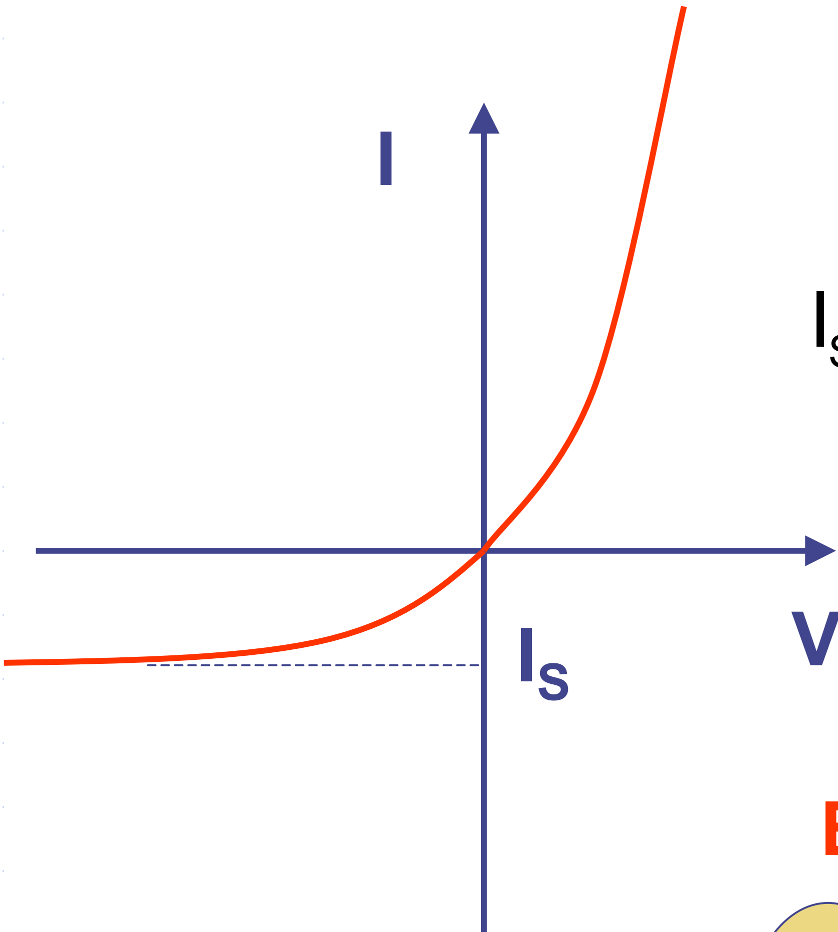
$$I = A\left[J_p(x_n) + J_n(-x_p)\right]$$

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

E ricordando che $p = \dfrac{n_i^2}{N_D}$ $\quad n = \dfrac{n_i^2}{N_A}$

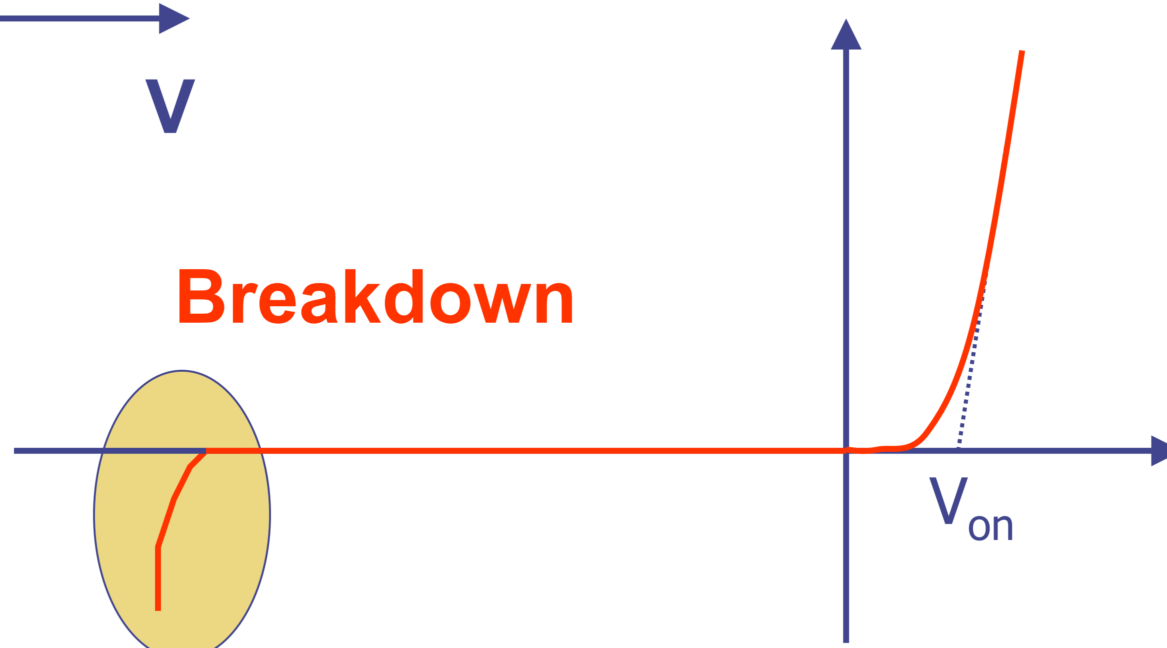
$$I = Aqn_i^2\left(\frac{D_p}{N_D L_p} + \frac{D_n}{N_A L_n}\right)\left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1\right) = I_S\left(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1\right)$$

Caratteristica I-V della giunzione PN



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

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



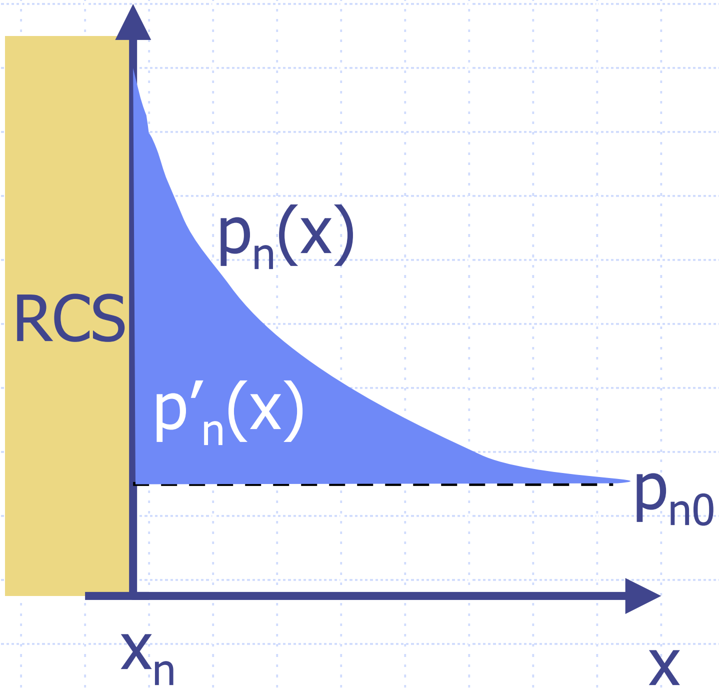
La giunzione *polarizzata*
Diretta-inversa

Filmato dimostrativo

Capacità parassite nei diodi
(Polarizzazione diretta)

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

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



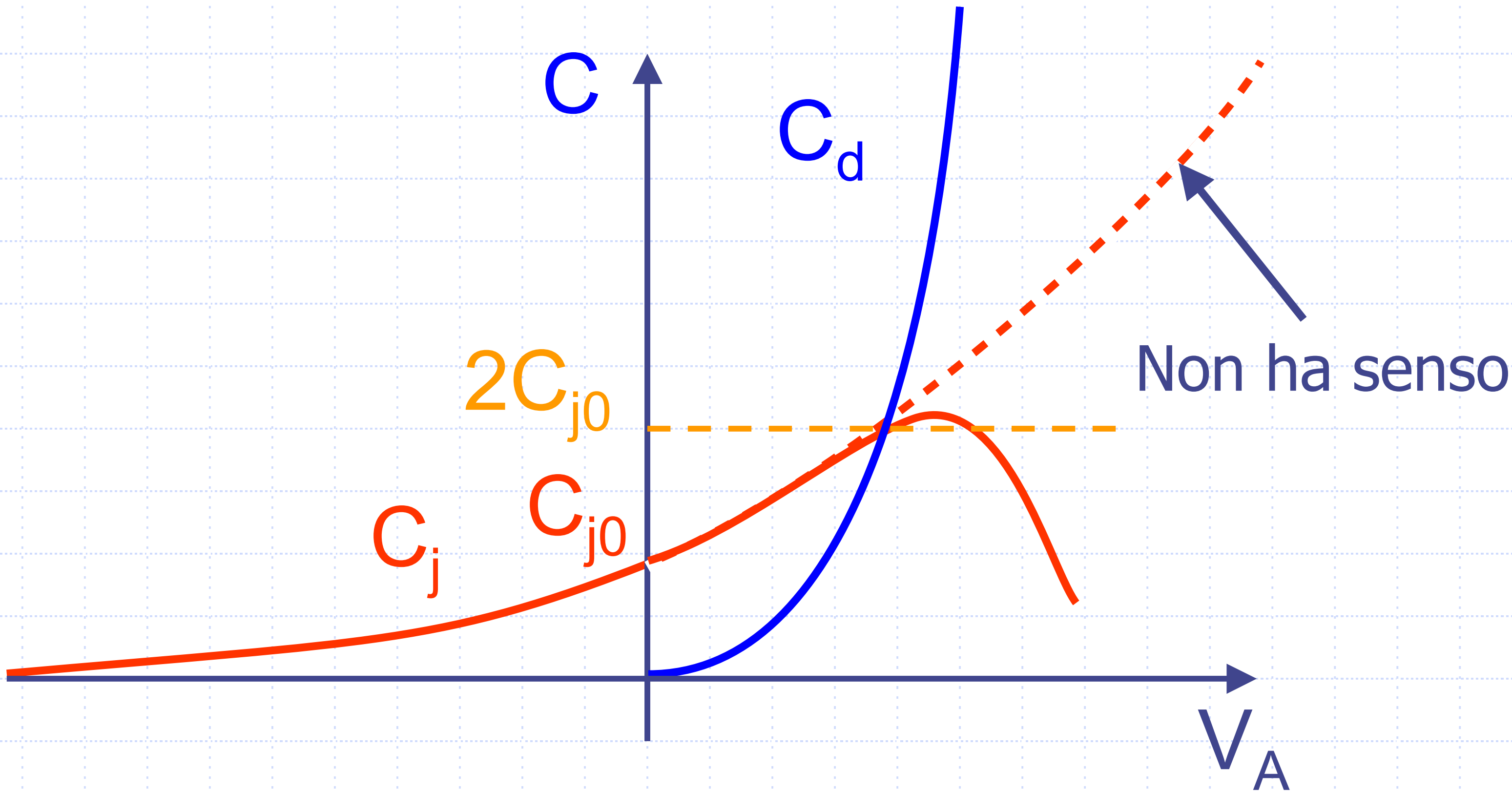
Analogalmente: $Q_n = I_n \tau_n$

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

Capacita' parassite nei diodi



In polarizzazione inversa (o debolmente diretta) domina la capacita' di giunzione.
In **forte** polarizzazione diretta domina la capacita' di diffusione