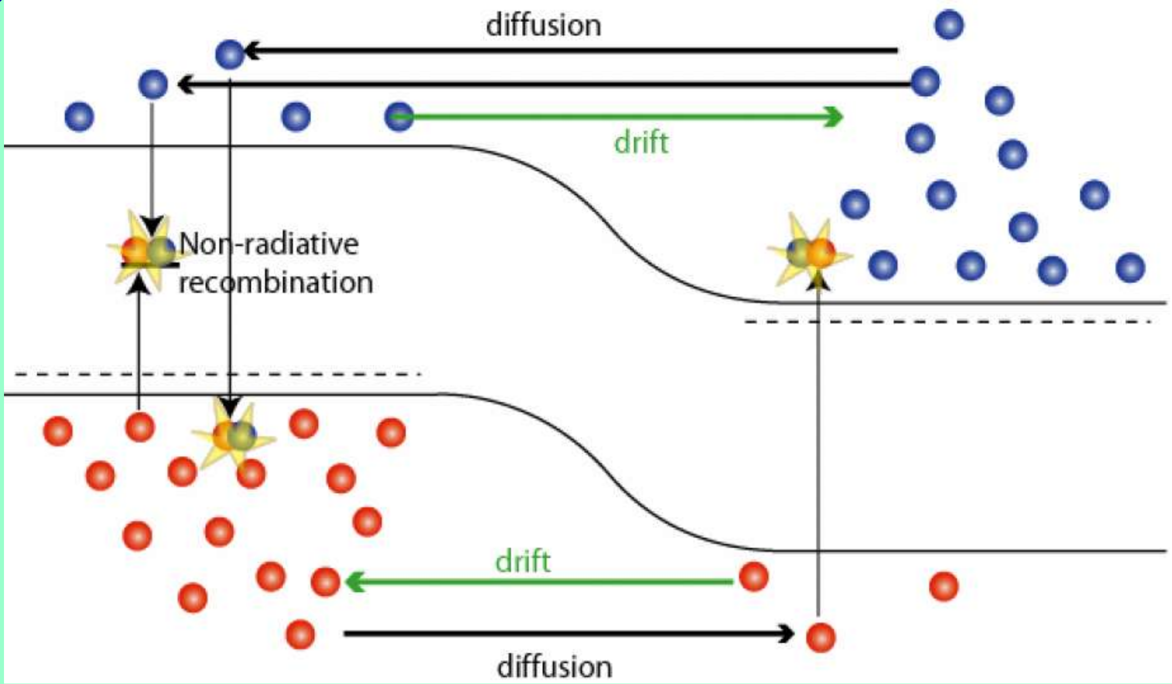
Polarizzazione della giunzione p-n

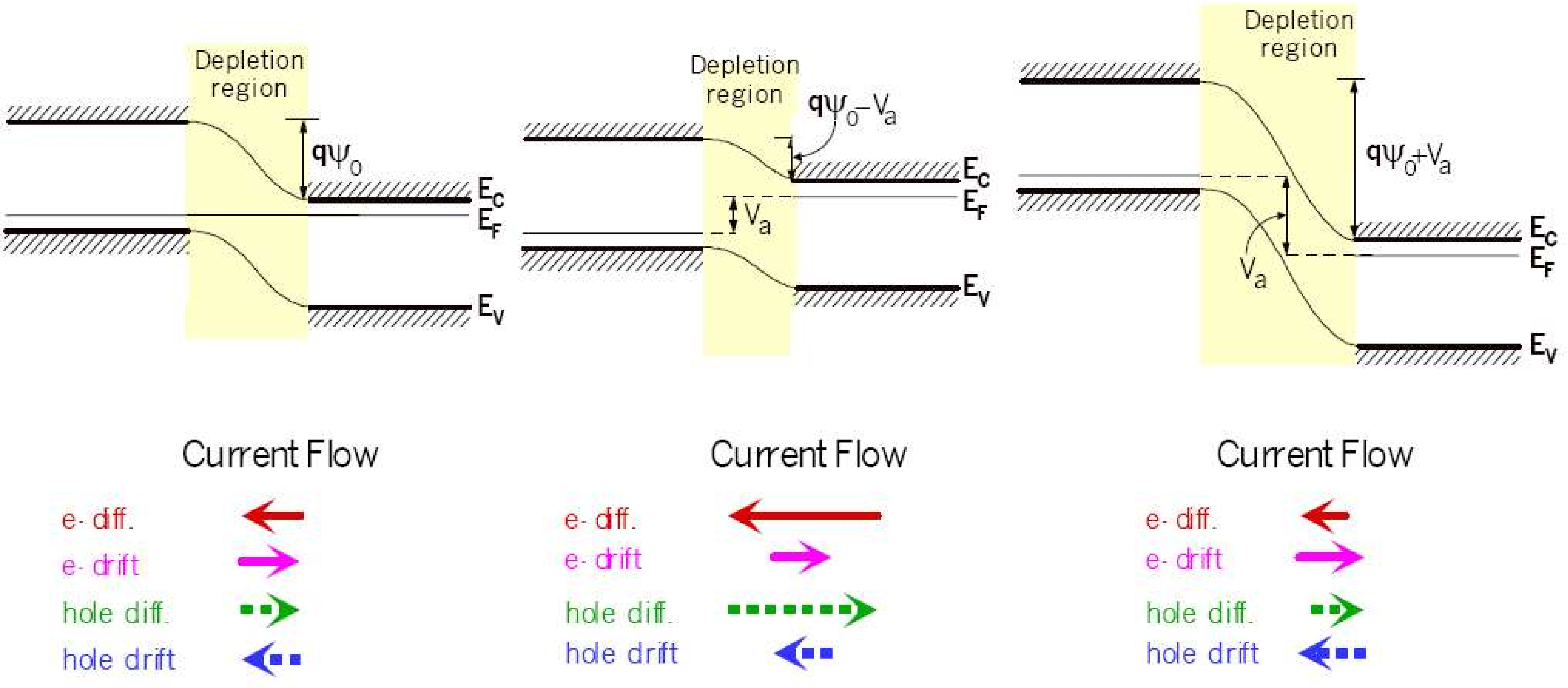
- Una polarizzazione diretta corrisponde ad applicare una tensione che RIDUCE il campo elettrico all'interfaccia. La polarizzazione inversa AUMENTA il campo elettrico all'interfaccia
- L'applicazione di una tensione modifica l'equilibrio tra corrente di diffusione e di deriva
- Riducendo il campo elettrico (pol. diretta) riduce la barriera per la corrente di diffusione, determinando un incremento della stessa. La corrente di deriva non cambia. Si osserva quindi un flusso netto di corrente.



- In polarizzazione inversa la barriera per la corrente di diffusione aumenta, riducendo la corrente di diffusione stessa, mentre la corrente di deriva rimane invariata. Di nuovo, si osserva un flusso netto (molto piccolo in questo caso) di corrente.

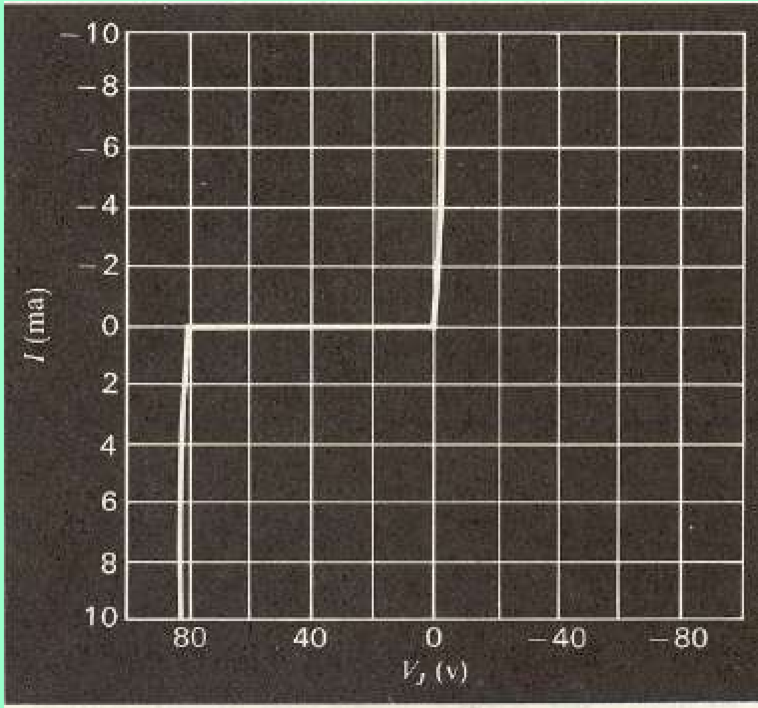
Polarizzazione della giunzione p-n

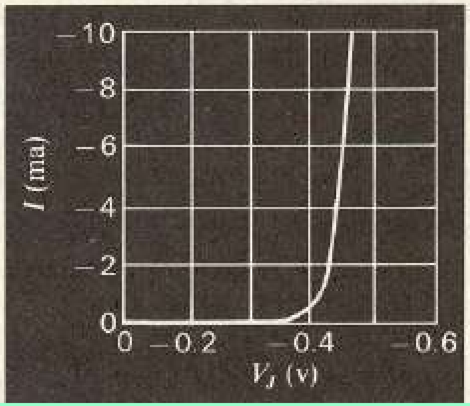
- Diagramma a bande e schema delle correnti
- L'effetto della tensione applicata è indicato dalla differenza tra i livelli di Fermi (quasi-livelli di Fermi)



Equazione ideale del diodo:rettificazione

- La caratteristica più importante della giunzione p-n è la rettificazione
- In polarizzazione diretta fluisce una corrente elevata che dipende dalla tensione applicata
- In polarizzazione inversa passa solo una debole corrente, indipendente dalla tensione, fino a tensioni inverse piuttosto elevate per cui si ha un forte incremento dlla corrente inversa (**breakdown**)





Regione di svuotamento: effetti polarizzazione

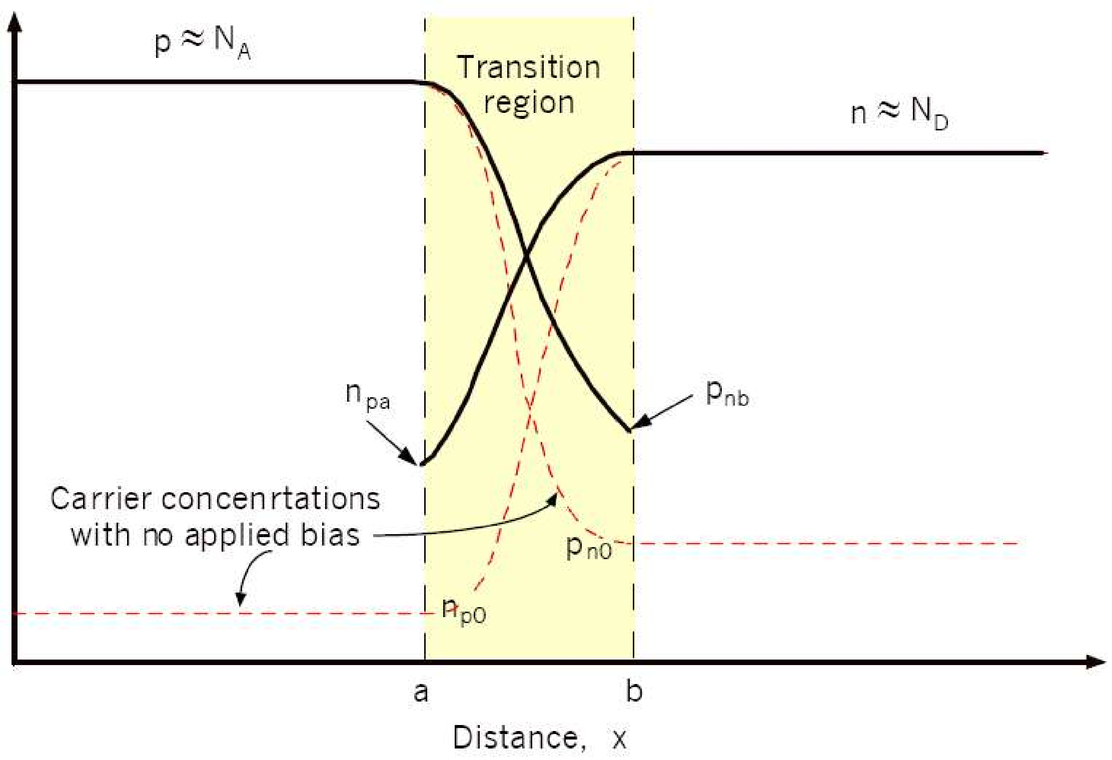
- L'applicazione di una tensione modifica il potenziale interno. Assumendo che tutta la tensione risulti applicata alla regione di svuotamento basta sostituire nelle eq. precedenti Ψ_0 con $(\Psi_0\text{-}V_a)$

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D}\right)(\Psi_0 - V_a)}$$

- La polarizzazione diretta **riduce** l'ampiezza della zona di svuotamento, mentre la polarizzazione inversa la **aumenta**.

Polarizzazione diretta: iniezione portatori

- L'applicazione di una polarizzazione diretta alla giunzione p-n aumenta il numero di portatori che diffondono da un lato all'altro della giunzione
- Questo provoca un incremento del numero di portatori minoritari dal valore di equilibrio (calcolato alla soglia della regione di svuotamento), il numero di portatori in eccesso dipende dalla tensione applicata
- L'introduzione di portatori minoritari in eccesso a causa della polarizzazione diretta è detta "**iniezione**" di portatori
- In assenza di generazione, il numero di portatori si riduce lontano dalla giunzione a seguito della ricombinazione
- A distanza di alcune "lunghezze di diffusione" dalla giunzione le concentrazioni di portatori tornano ai valori di equilibrio



Equazione ideale del diodo

- Applichiamo le equazioni di continuità, di Poisson e di trasporto per ricavare l'equazione caratteristica del diodo
- Sotto le seguenti condizioni:
  1. Approssimazione regione di svuotamento
  2. Condizioni di stazionarietà (le derivate temporali nell'eq. di continuità si annullano)
  3. Generazione/Ricombinazione nulle in regione di svuotamento
  4. Bassi livelli di iniezione nelle regioni bulk
  5. Campo elettrico nullo nelle regioni bulk
  6. Regioni bulk drogate uniformemente

Equazione ideale del diodo - 1

$$J_p = q\mu_p p\mathcal{E} - qD_p\frac{\partial p}{\partial x}$$

$$J_n = q\mu_n n\mathcal{E} + qD_n\frac{\partial n}{\partial x}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q}\frac{\partial J_p}{\partial x} - \frac{\delta p}{\tau_p} = D_p\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \mu_p\mathcal{E}\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\delta p}{\tau_p} \quad \textit{for holes}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q}\frac{\partial J_n}{\partial x} - \frac{\delta n}{\tau_n} = D_n\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \mu_n\mathcal{E}\frac{\partial n}{\partial x} - \frac{\delta n}{\tau_n} \quad \textit{for electrons}$$

↑ Eq. trasporto

↑ Eq. continuità

per i minoritari, lato n

$$p_n = p_{n0} + \delta p_n(x)$$

$$J_p \cong -qD_p\frac{\partial \delta p_n}{\partial x} \quad \textit{for holes}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0 = -\frac{1}{q}\frac{\partial J_p}{\partial x} - \frac{\delta p_n}{\tau_p} = D_p\frac{\partial^2 \delta p_n}{\partial x^2} - \frac{\delta p_n}{\tau_p} \quad \textit{for holes}$$

per i minoritari, lato p

$$n_p = n_{p0} + \delta n_p(x)$$

$$J_n \cong qD_n\frac{\partial \delta n_p}{\partial x} \quad \textit{for electrons}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = 0 = -\frac{1}{q}\frac{\partial J_n}{\partial x} - \frac{\delta n_p}{\tau_{np}} = D_n\frac{\partial^2 \delta n_p}{\partial x^2} - \frac{\delta n_p}{\tau_{np}} \quad \textit{for electrons}$$

Equazione ideale del diodo - 2

- Risolvendo le eqs. precedenti si ricavano le densità di corrente dei minoritari
- Complessivamente deve valere la condizione di corrente costante

$$J = J_n(x) + J_p(x) = C$$

- In assenza di generazione/ricombinazione nella regione di svuotamento, note le correnti alla soglia della regione dal lato bulk, per continuità deve essere

$$J_p(x_n) = -qD_p \left.\frac{dp_n}{dx}\right|_{x=x_n} \qquad J_n(-x_p) = qD_n \left.\frac{dn_p}{dx}\right|_{x=-x_p}$$

- Note le densità di corrente per elettroni e lacune, la corrente totale deve essere

$$J = J_n(-x_p) + J_p(x_n)$$

Equazione ideale del diodo - 3

- Nelle regioni bulk il campo elettrico è nullo (bassi livelli di iniezione)
- Nella regione di svuotamento, in condizione di bassi livelli di iniezione, i valori di campo elettrico e di densità di portatori non differiscono molto dai valori di equilibrio. Pertanto

$$E = \frac{-qD_n}{q\mu_n n}\frac{dn}{dx} = -\frac{kT}{q}\frac{1}{n}\frac{dn}{dx}$$

$$V_{bi} - V_A = -\int_{-\infty}^{\infty} E(x)dx = \frac{kT}{q}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{n}\frac{dn}{dx}dx = \frac{kT}{q}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{1}{n}dn = \frac{kT}{q}\ln n\Big|_{x=-\infty}^{x=+\infty}$$

$$= \frac{kT}{q}\ln\frac{n_n(x_n)}{n_p(-x_p)} \quad or$$

$$n_p(-x_p) = n_n(x_n)e^{-qV_{bi}/kT}e^{qV_A/kT}$$

Equazione ideale del diodo - 4

- In equilibrio sappiamo che

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_{n0} p_{p0}}{n_i^2}$$

$$e^{-qV_{bi}/kT} = \frac{n_i^2}{n_{n0} p_{p0}}$$

quindi

$$n_p(-x_p) = n_n(x_n) \frac{n_i^2}{n_{n0} p_{p0}} e^{qV_A/kT} = \frac{n_i^2}{p_{p0}} e^{qV_A/kT} = n_{p0} e^{qV_A/kT}$$

- Pertanto la densità di portatori minoritari iniettati all'interfaccia $x=-x_p$ deve essere

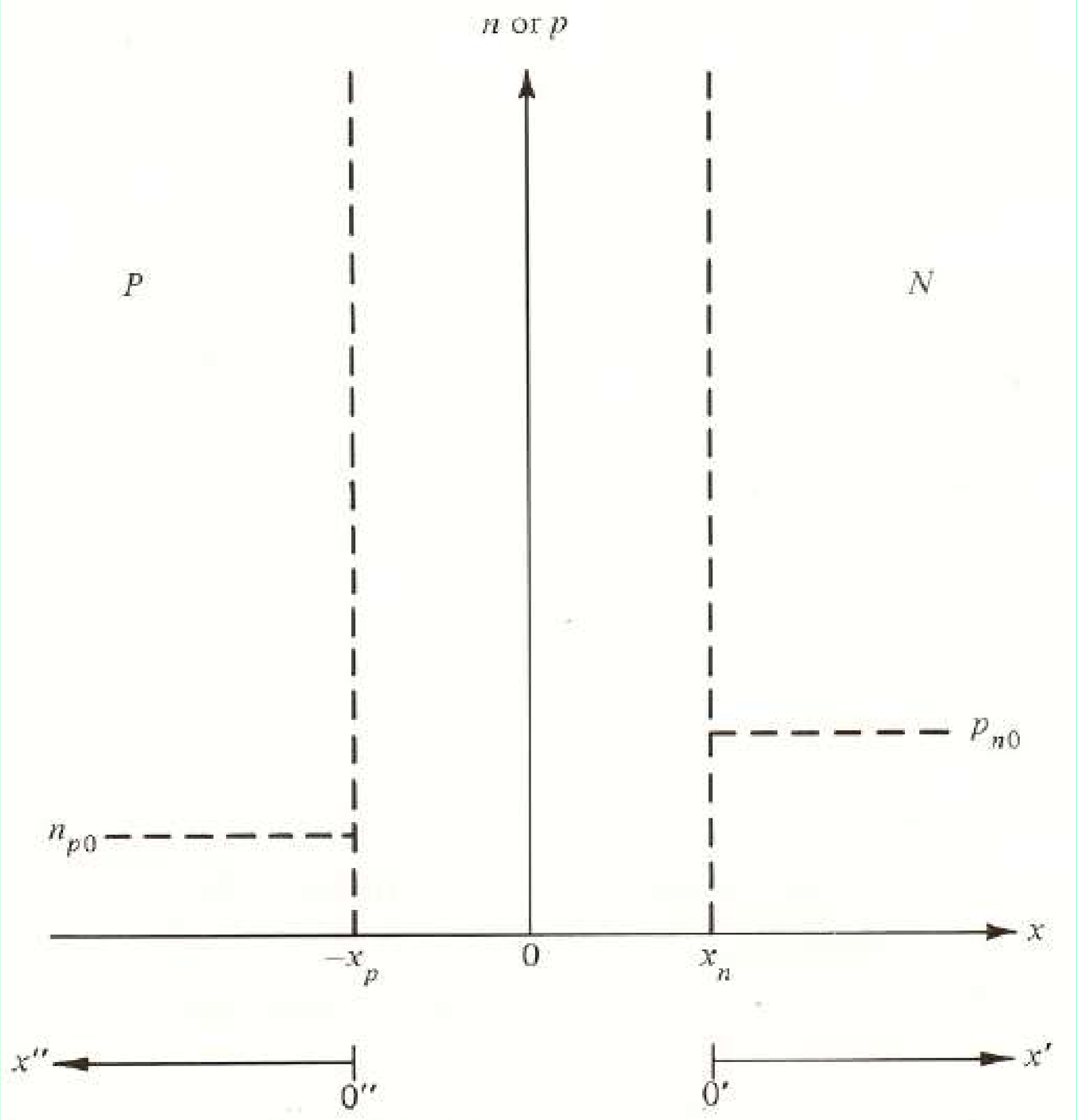
$$\delta n_p(-x_p) = n_{p0}(e^{qV_A/kT} - 1)$$

- In maniera complementare si ricava per le lacune all'interfaccia $x=x_n$

$$p_n(x_n) = p_{n0} e^{qV_A/kT} \qquad \delta p_n(x_n) = p_{n0}(e^{qV_A/kT} - 1)$$

Equazione ideale del diodo - 5

- Ridefiniamo il sistema di coordinate



Equazione ideale del diodo - 6

- L'ultima condizione è dettata dal tempo di vita "finito" per i minoritari iniettati nelle regioni bulk, che implica
  quindi $\delta n_p(-\infty)=0$ $\delta p_n(-\infty)=0$
  - Per gli elettroni minoritari nel lato bulk p deve essere, per l'eq. di continuità

$$0 = -\frac{1}{q}\frac{\partial J_n}{\partial x''} - \frac{\delta n_p}{\tau_n} = D_n \frac{\partial^2 \delta n_p(x'')}{\partial x''^2} - \frac{\delta n_p(x'')}{\tau_n}$$

$$\frac{\partial^2 \delta n_p(x'')}{\partial x''^2} = \frac{\delta n_p(x'')}{D_n \tau_n} = \frac{\delta n_p(x'')}{L_n}$$

- Avendo definito la lunghezza di diffusione $L_n=\sqrt{D_n \tau_n}$ la soluzione è del tipo

$$\delta n(x'') = A_1 e^{x''/L_n} + A_2 e^{-x''/L_n}$$

Equazione ideale del diodo - 7

- Valutiamo A_1 e A_2 dalle condizioni al contorno

$$\delta n_p(x=-\infty) = \delta n_p(x''=\infty) = 0 = A_1 \exp(\infty) + A_2 \exp(-\infty) = A_1 \exp(\infty)$$

- da cui segue $A_1=0$. Per $x=-x_p$

$$\delta n_p(x=-x_p) = \delta n_p(x''=0) = n_{p0}(e^{qV_A/kT}-1) = A_2 e^{-0''/L_n} = A_2$$

- la soluzione diventa $\delta n_p(x'') = n_{p0}(e^{qV_A/kT}-1)e^{-x''/L_n}$

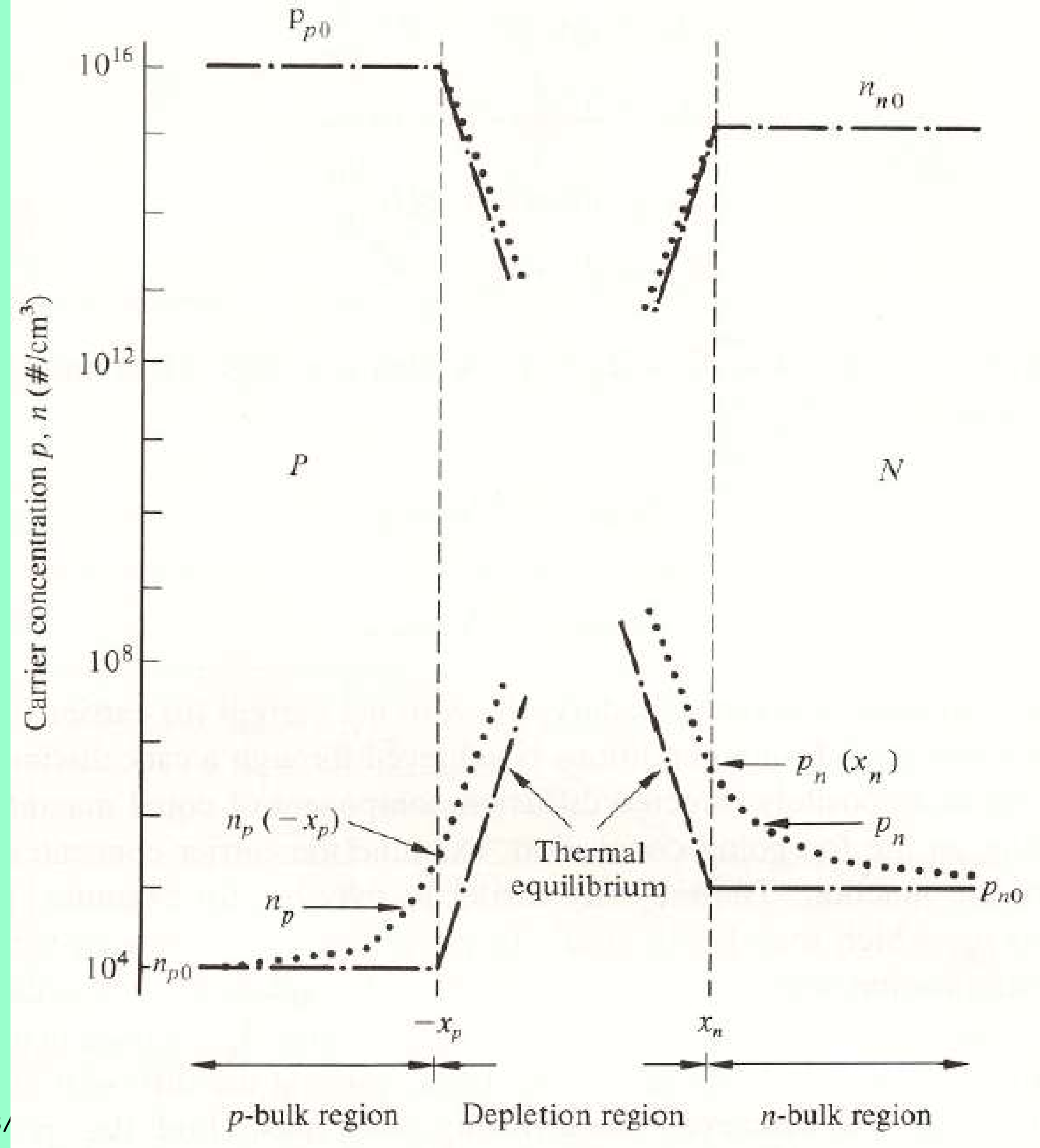
- quindi il contributo dei minoritari alla corrente di diffusione risulta

$$J_n(x'') = qD_n \frac{dn_p}{dx''} = qD_n n_{p0}(e^{qV_A/kT}-1)\left(\frac{-1}{L_n}\right)e^{-x''/L_n}$$

$$J_n(x''=0) = J_n(x=-x_p) = -q\frac{D_n}{L_n} n_{p0}(e^{qV_A/kT}-1)$$

Equazione ideale del diodo - 8

- Andamento della concentrazione di portatori



Equazione ideale del diodo - 8

$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$

- Analogamente per le lacune

$$0 = -\frac{1}{q}\frac{\partial J_p}{\partial x'} - \frac{\delta p_n}{\tau_p} = D_p \frac{\partial^2 \delta p_p(x')}{\partial x''^2} - \frac{\delta p_n(x')}{\tau_p}$$

$$\frac{\partial^2 \delta p_n(x')}{\partial x'^2} = \frac{\delta p_n(x')}{D_p \tau_p} = \frac{\delta p_n(x')}{L_p}$$

$$\delta p_n(x') = p_{n0}(e^{qV_A/kT} - 1)e^{-x'/L_p}$$

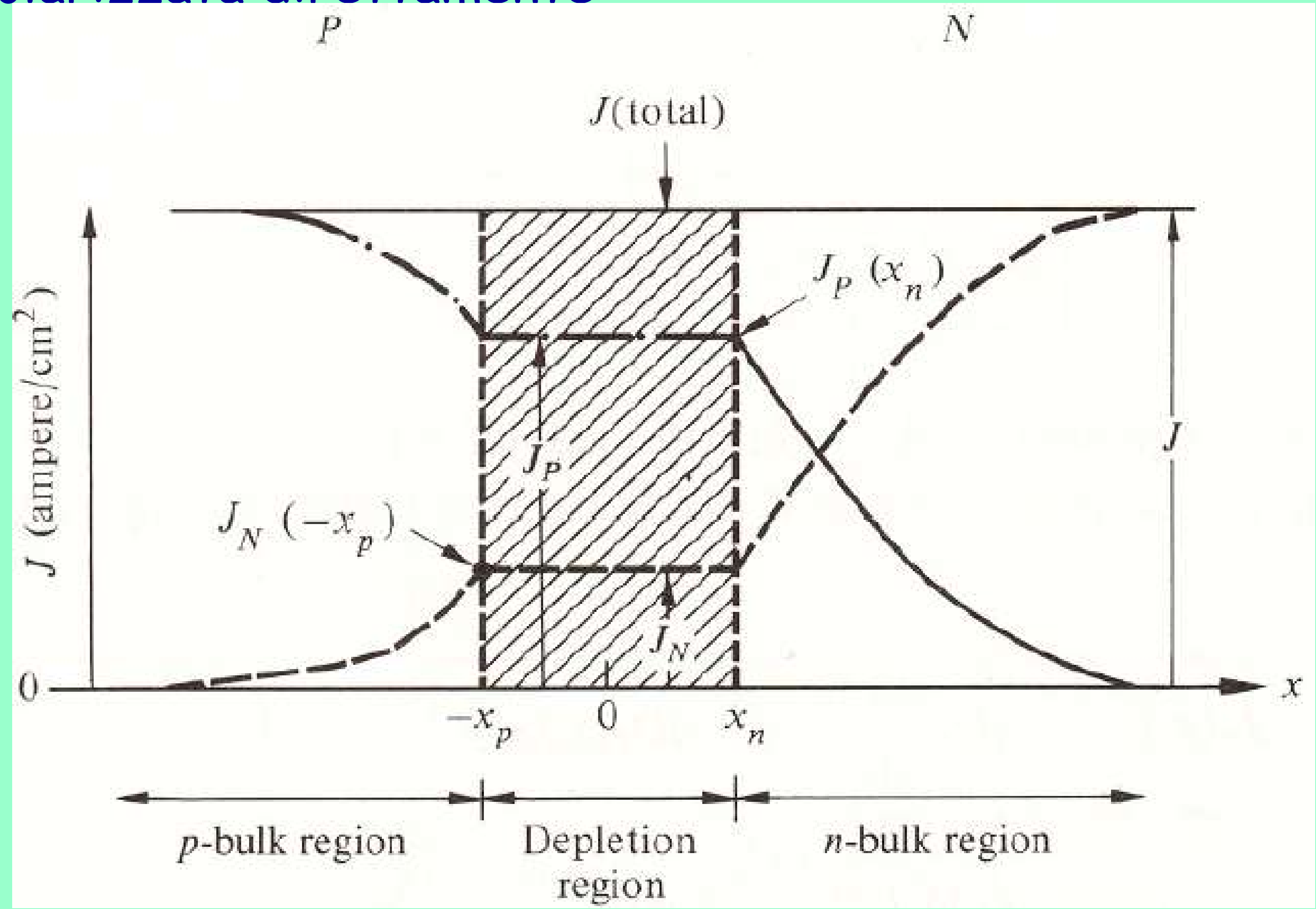
- La componente di corrente dovuta alle lacune è quindi

$$J_p(x') = -qD_p \frac{dp_n}{dx} = -qD_p p_{n0}(e^{qV_A/kT} - 1)\left(\frac{-1}{L_p}\right)e^{-x'/L_p}$$

$$J_p(x'=0) = J_p(x = x_n) = q\frac{D_p}{L_p} p_{n0}(e^{qV_A/kT} - 1)$$

Equazione ideale del diodo - 9

- Contributi alla densità di corrente per una giunzione p-n polarizzata direttamente



Equazione ideale del diodo - 10

- Complessivamente si ricava l'eq. di Schockley-Read

$$J = J_n + J_p = q\left[\frac{D_n}{L_n} n_{p0} + \frac{D_p}{L_p} p_{n0}\right]\left(e^{qV_A/kT} - 1\right)$$

$$I = qA\left[\frac{D_n}{L_n} n_{p0} + \frac{D_p}{L_p} p_{n0}\right]\left(e^{qV_A/kT} - 1\right) = I_0\left(e^{qV_A/kT} - 1\right)$$