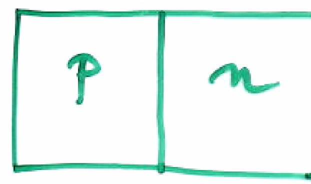
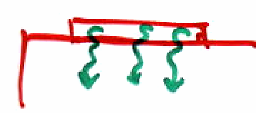
Δίοδοι ή Επαφές p-n

- ανορθωτικά κυκλώματα
- οπτοηλεκτρονικές διατάξεις
- διπολικό τρανζίστορ



Κατασκευή:
- επιταξιακά
- εμφύτευση ιόντων προσμίξεων
- διάχυση προσμίξεων

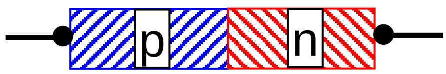


Υπόθεση: Απότομη επαφή

Επαφή p-n

• Γιατί έχει ενδιαφέρον ?

-σχεδόν κάθε διάταξη ημιαγωγών
συμπεριλαμβάνει επαφή p-n



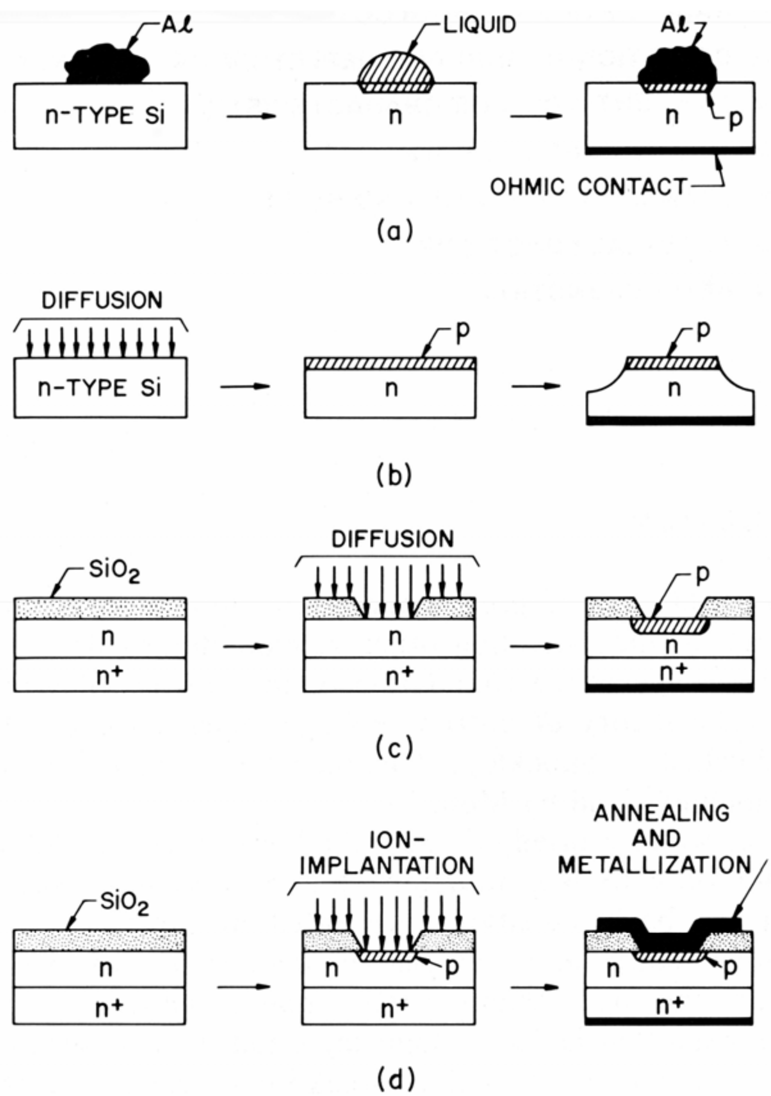
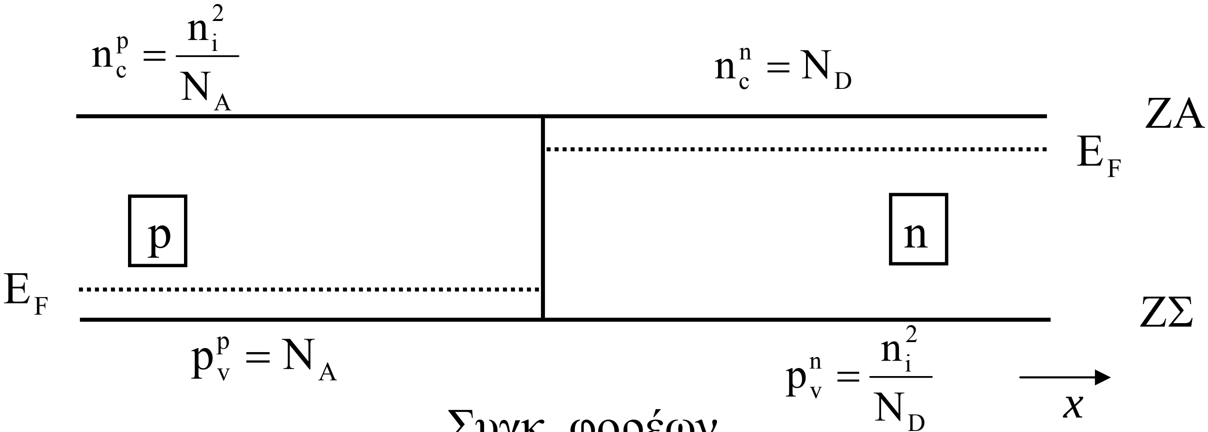
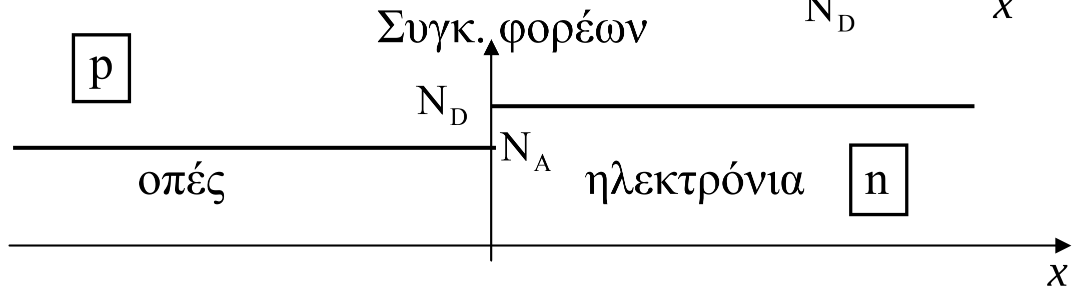


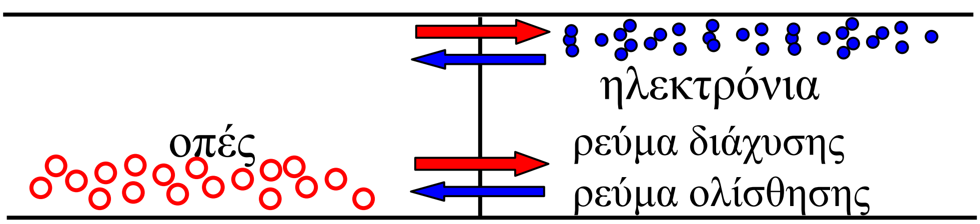
Fig. 1 Some device fabrication methods. (*a*) Alloyed junction. (*b*) Diffused mesa junction. (*c*) Diffused planar junction on epitaxial substrate. (*d*) Ion implantation.

• Πριν την αποκατάσταση της ισορροπίας (υποθετικά)





• αφού αποκατασταθεί ισορροπία



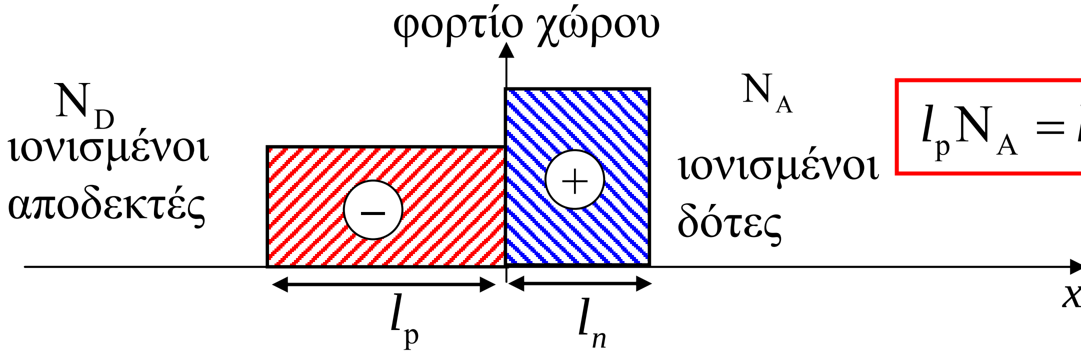
ρεύμα διάχυσης ($j^{e,h}_{\mathrm{diff}}$) = ρεύμα ολίσθησης($j^{e,h}_{\mathrm{drift}}$)

λόγω διαφοράς συγκέντρωσης φορέων

$$\boxed{j^{e,h}_{\mathrm{diff}} = e D_e \frac{\partial n}{\partial x}}$$

λόγω ηλεκτρικού πεδίου

$$\boxed{j^{e,h}_{\mathrm{drift}} = e \mu_e n F(x)}$$



$$\boxed{l_p N_A = l_n N_D}$$

Περιοχή απογύμνωσης στην ισορροπία

$$\boxed{\begin{aligned} j_e &= e\mu_e n E + e D_e \frac{\partial n}{\partial x} = 0 \\ j_h &= e\mu_h n E - e D_h \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \end{aligned}}$$

E - ηλεκτρικό πεδίο

$\mu_{e,h}$ – ευκινησία

$D_{e,h}$ – σταθερά διάχυσης

$$\boxed{D_{e,h} = \frac{kT\mu_{e,h}}{e}}$$

Σχέση Einstein

- Τάση επαφής p-n

$$E = -\frac{dV}{dx} \quad , \quad E\,dx = \frac{eD_h}{e\mu_h p}dp = \frac{kT}{e}\frac{dp}{p}$$

$$V_{bi} = -\int_p^n E\,dx = -\frac{kT}{e}\int_p^n \frac{dp}{p} = \frac{kT}{e}\ln\frac{p^p}{p^n}$$

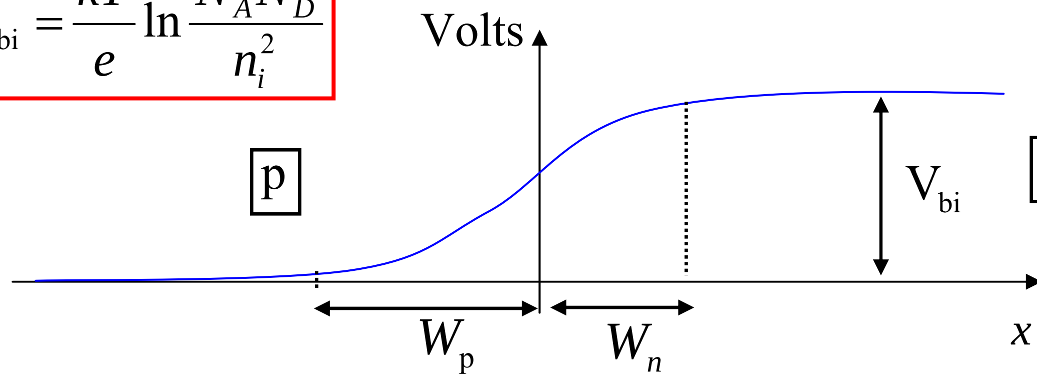
p^p → φορείς πλειονότητας στο p

p^n → φορείς μειονότητας στο n

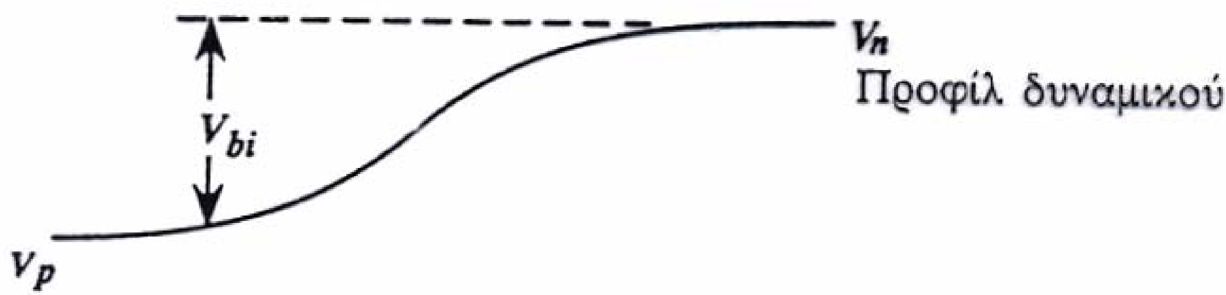
$$\Rightarrow V_B = \frac{kT}{e}\ln\frac{p^p}{p^n} = \frac{kT}{e}\ln\frac{p^p}{n_i^2/N_D} = \frac{kT}{e}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

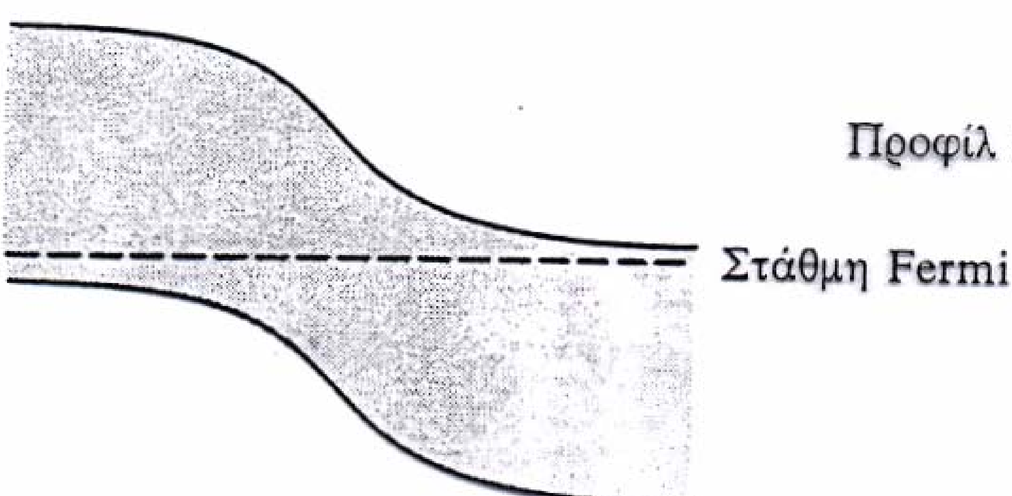
Σχέση Boltzmann

$$\boxed{V_{bi} = \frac{kT}{e}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2}}$$




Πυκνότητα Οπών
p_p
p_n
Πυκνότητα Ηλεκτρονίων
n_p
n_n
p
n
Δομή
$-W_p$
0
W_n
x


V_n
Προφίλ δυναμικού
V_{bi}
V_p


Προφίλ Ζωνών
Στάθμη Fermi

Ομοίως για e,

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \cdot \ln \frac{n_n}{n_p} = \frac{kT}{e} \cdot \ln \frac{p_p}{p_n}$$

$$\left(n_n p_n = n_p \cdot p_p = n_i^2 \right)$$

Εύρος απογύμνωσης

ολικό αρνητικό φορτίο περιοχή $(-W_p, 0)$ = ολικό θετικό φορτίο περιοχή $(0, +W_n)$

$$\Rightarrow \quad A \cdot W_p \cdot N_a = A \cdot W_n \cdot N_d$$

διατομή

Εξίσωση Poisson : $\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_0}$

$$\frac{d^2V}{dx} = 0 \qquad -\infty < x < -W_p$$

$$= \frac{e \cdot N_a}{\epsilon} \qquad -W_p < x < 0$$

$$= -\frac{e N_d}{\epsilon} \qquad 0 < x < W_n$$

$$= 0 \qquad W_n < x < \infty$$

$V(x) = V_p \qquad -\infty < x < -W_p$

Λύνοντας, $\Rightarrow$

p-μεριά

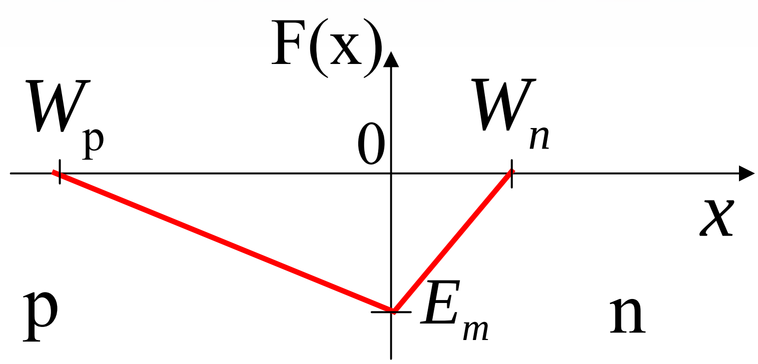
$$F(x) = -\frac{eN_a x}{\epsilon} - \frac{e \cdot N_a W_p}{\epsilon} \qquad -W_p < x < 0$$

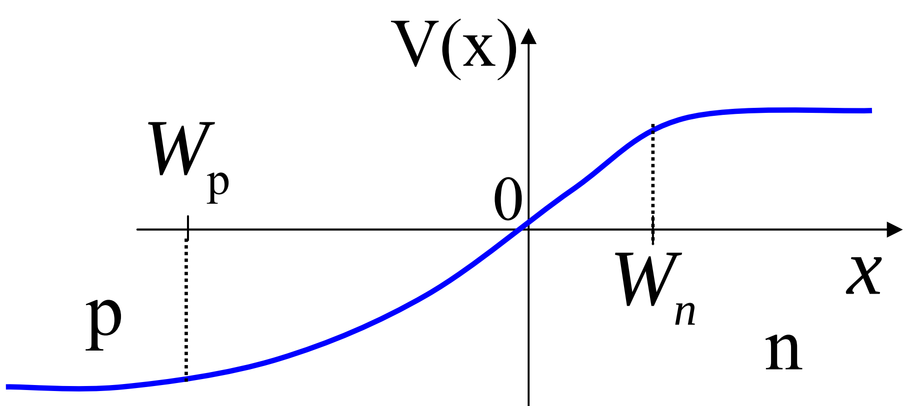
$$V(x) = \frac{eN_a x^2}{2\epsilon} + \frac{e \cdot N_a W_p x}{\epsilon} + \frac{eN_a W_p^2}{2\epsilon} + V_p$$

n-μεριά

$$F(x) = \frac{eN_d x}{\epsilon} - \frac{eN_d W_n}{\epsilon} \qquad 0 < x < W_n$$

$$V(x) = -\frac{eN_d x^2}{2\epsilon} + \frac{eN_d W_n x}{\epsilon} - \frac{e \cdot N_d W_n^2}{2\epsilon} + V_n$$





$$\left.\begin{aligned} V(0) - V(-W_p) &= \frac{eN_a \cdot W_p^2}{2\epsilon} \\ V(W_n) - V(0) &= \frac{eN_d W_n^2}{2\epsilon} \end{aligned}\right\} \quad V_{bi} = \frac{e \cdot N_d W_n^2}{2\epsilon} + \frac{eN_a \cdot W_p^2}{2\epsilon}$$

Δεδομένου ότι $N_d W_n = N_a W_p \Rightarrow$

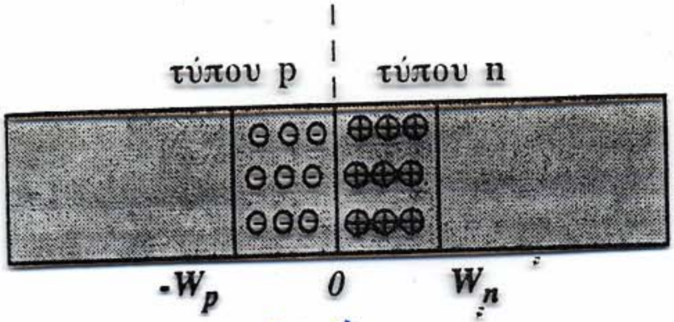
$$\boxed{\begin{aligned} W_p(V_{bi}) &= \left\{ \frac{2\epsilon V_{bi}}{e} \cdot \left[\frac{N_d}{N_a \cdot (N_a + N_d)} \right] \right\}^{1/2} \\ W_n(V_{bi}) &= \left\{ \frac{2\epsilon V_{bi}}{e} \cdot \left[\frac{N_a}{N_d \cdot (N_a + N_d)} \right] \right\}^{1/2} \end{aligned}}$$

$$\Rightarrow \quad W = W_n + W_p = \dots =$$

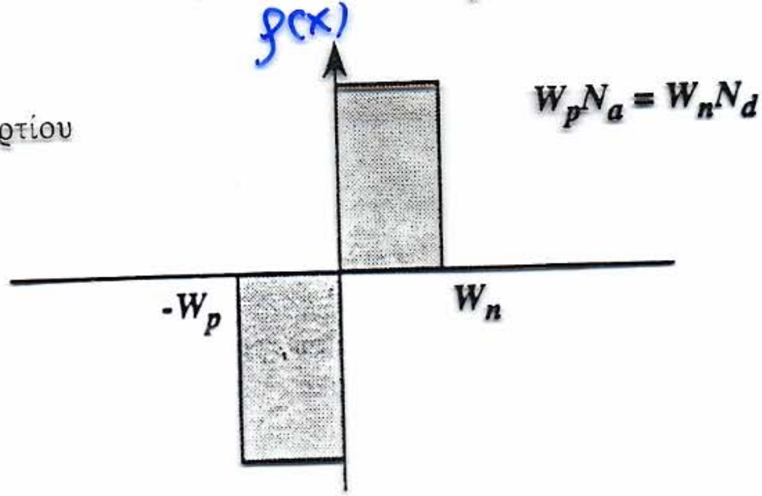
$$= \left[\frac{2\epsilon V_{bi}}{e} \cdot \left(\frac{N_a + N_d}{N_a \cdot N_d} \right) \right]^{1/2}$$

Παρ. 6.1.

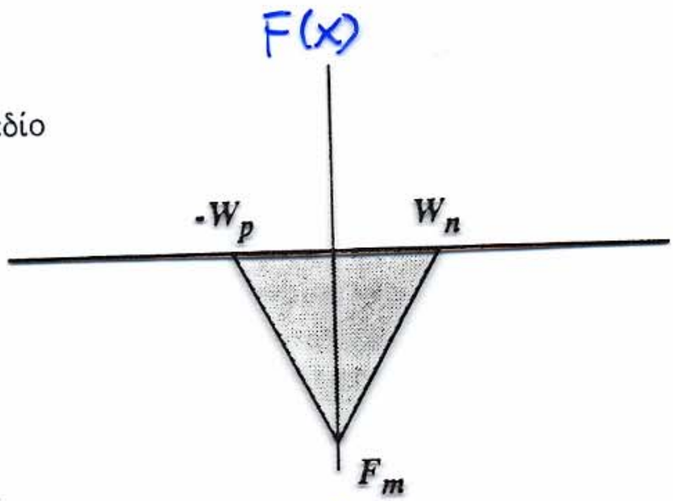
Δομή

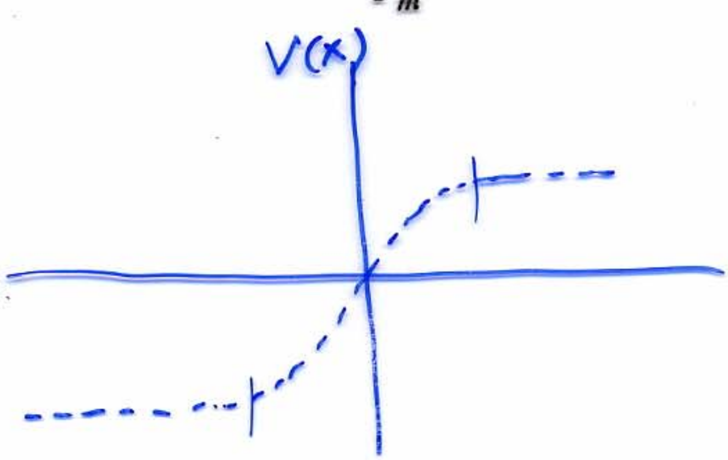


Πυκνότητα φορτίου

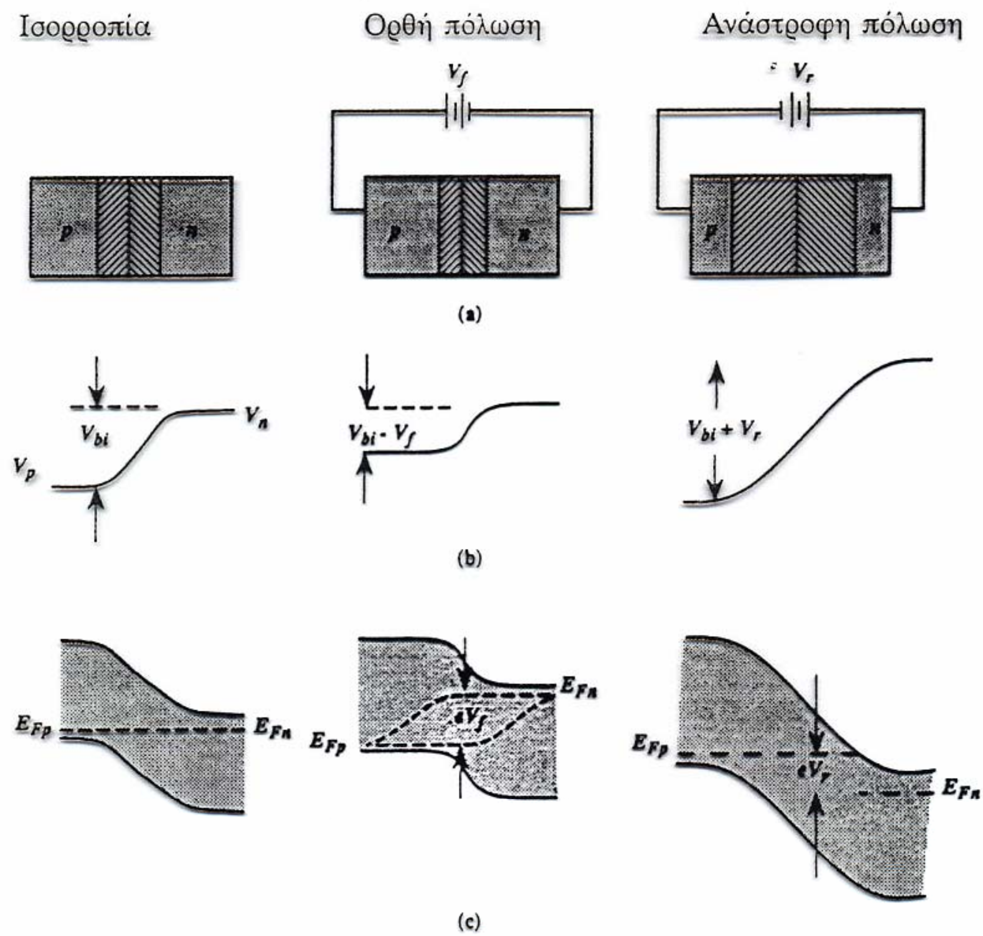


Ηλεκτρικό πεδίο





P-N Επαφή υπό πόλωση



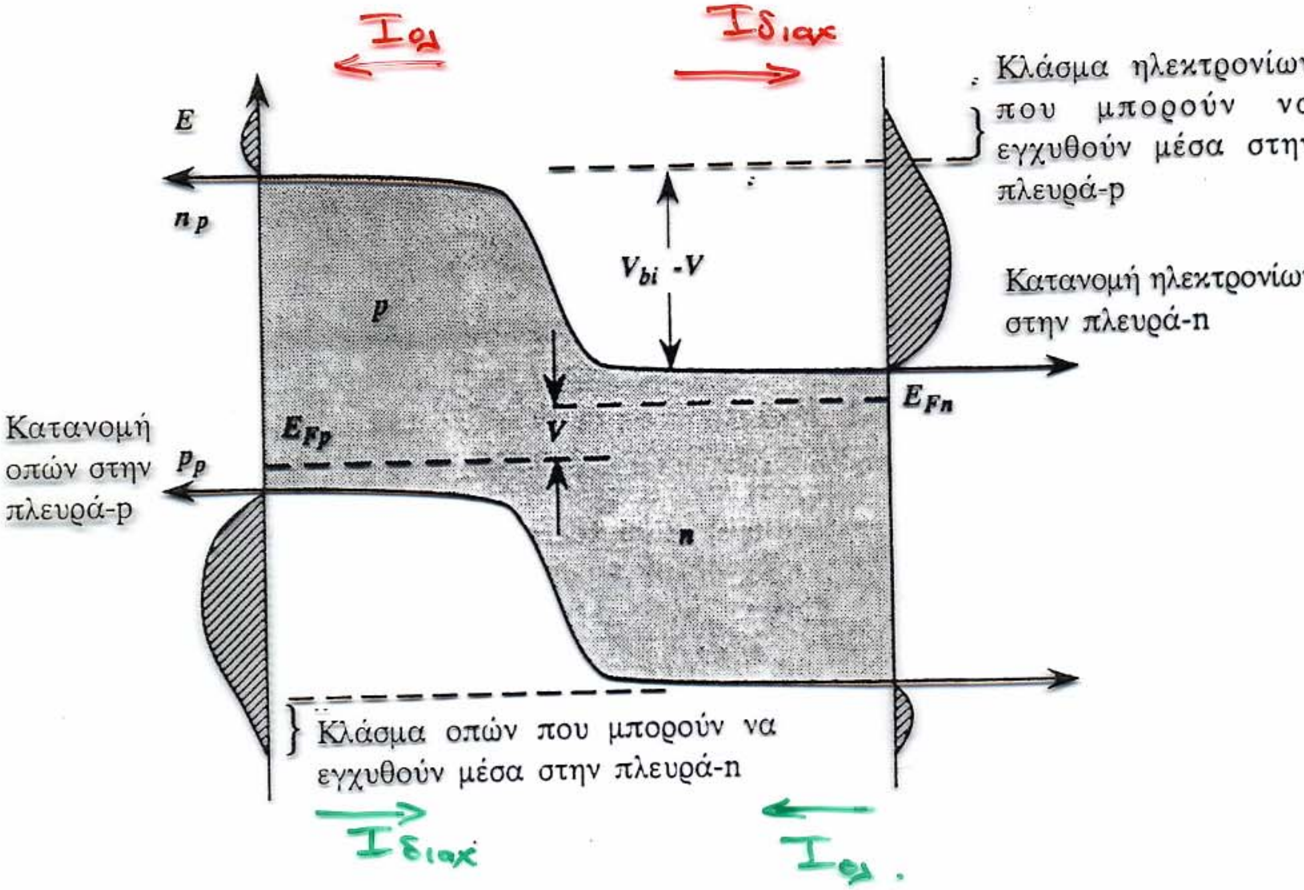
ορθή πόλωση, $V_f > 0$, $V = V_{bi} - V_f$

ανάστροφη, $V = V_{bi} + V_f$

Υπό συνθήκες ψευδο-ισορροπίας, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις σχέσεις για τα W_n, W_p, $F(x)$ αρκεί να αντικαταστήσουμε V_{bi} με $V_{bi} \mp V_f$ (παρ.6.2)

Στην ισορροπία $I_{ολ} = I_{διαχ}$ (e)

$I_{ολ} = I_{διαχ}$ (h)



Με πόλωση, και το $I_{ολ}^{(h)}$ και το $I_{ολ}^{(e)}$ δεν αλλάζαν.

Αυτό που αλλάζει πολύ είναι το ρεύμα διάχυσης

οπών στην περιοχή n

ηλεκτ. στην περιοχή p

Ψευδο-ισορροπία:

$$\boxed{\frac{p(W_n)}{p_n} = e^{eV/k_BT} \qquad \frac{n(-W_p)}{n_p} = e^{eV/k_BT}}$$

$$\Rightarrow \quad \Delta p_n = p(W_n) - p_n = p_n\left(e^{eV/kT} - 1\right) \quad \text{στο } +W_n$$

$$\Delta n_p = n(-W_p) - n_p = n_p\left(e^{eV/kT} - 1\right) \quad \text{στο } -W_p$$

Η περίσσεια φορέων μειονότητας, υφίσταται επανασύνδεση με τους φορείς πλειονότητας

Μήκη διάχυσης $\quad L_p = \sqrt{D_p \cdot \tau_p}$

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n}$$

$$\Delta p_n(x) = p_n \cdot \left(e^{eV/kT} - 1\right) e^{-(x-W_n)/L_p} \quad \text{για } x > W_n$$

$$\Delta n(x) = n_p \cdot \left(e^{eV/kT} - 1\right) e^{(x+W_p)/L_n} \quad \text{για } x < W_p$$

Άρα

$$I_p(x) = -e\cdot A\cdot D_p \cdot \frac{d}{dx}\Delta p_n(x) =$$

$$= +eA\cdot \frac{D_p}{L_p}\cdot \Delta p_n(x)$$

$$I_p(w_n) = e\cdot \frac{A\cdot D_p}{L_p}\cdot p_n\cdot \left(e^{eV/kT}-1\right)$$

Ομοίως

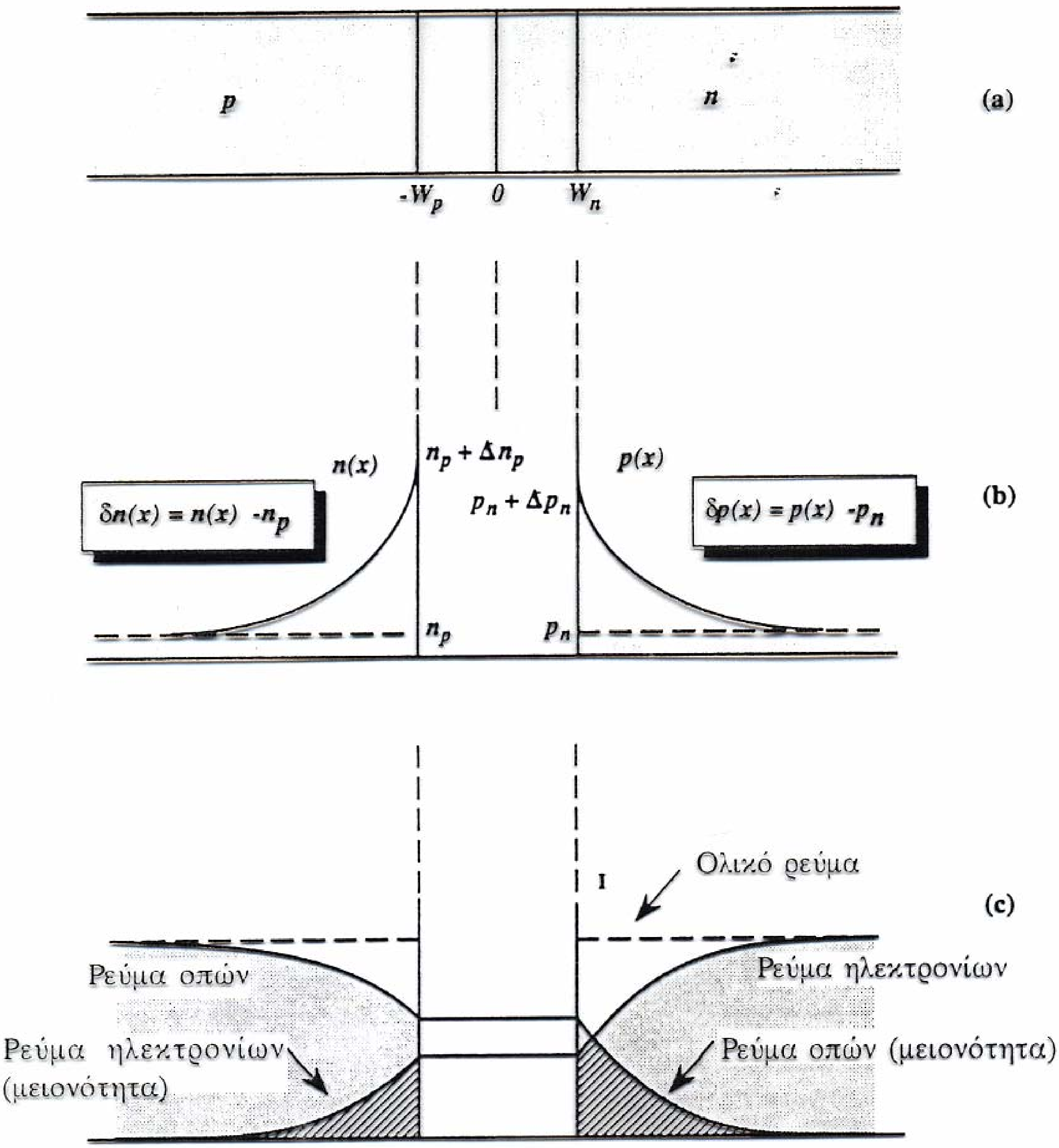
$$I_n(-w_p) = \frac{eA\cdot D_n}{L_n}\cdot n_p\cdot \left(e^{eV/kT}-1\right)$$

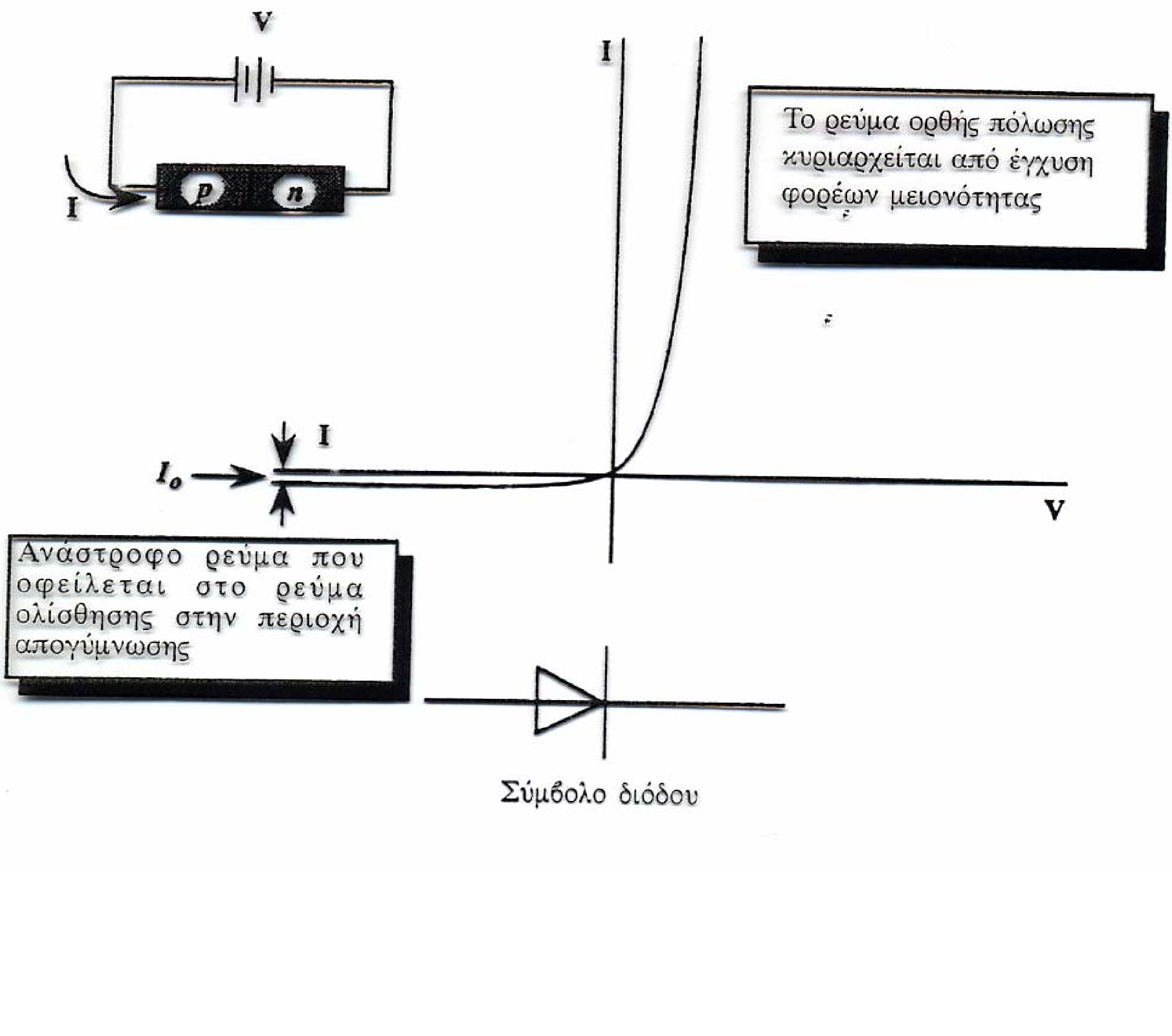
$$I(V) = I_p(w_n) + I_n(-w_p)$$

$$= e\cdot A\cdot\left[\frac{D_p}{L_p}\cdot p_n + \frac{D_n}{L_n}\cdot n_p\right]\left(e^{eV/kT}-1\right)$$

$$= I_o\cdot\left(e^{eV/kT}-1\right)$$

$$I_o = e\cdot A\cdot\left(\frac{D_p\cdot p_n}{L_p} + \frac{D_n\cdot n_p}{L_n}\right)$$


p
n
(a)
-Wp
0
Wn
n(x)
np + Δnp
p(x)
δn(x) = n(x) -np
pn + Δpn
δp(x) = p(x) -pn
(b)
np
pn
Ολικό ρεύμα
I
(c)
Ρεύμα οπών
Ρεύμα ηλεκτρονίων
Ρεύμα ηλεκτρονίων
(μειονότητα)
Ρεύμα οπών (μειονότητα)


V
I
p
n
I
Το ρεύμα ορθής πόλωσης κυριαρχείται από έγχυση φορέων μειονότητας
I
I_o
V
Ανάστροφο ρεύμα που οφείλεται στο ρεύμα ολίσθησης στην περιοχή απογύμνωσης
Σύμβολο διόδου