

Φυσική και Τεχνολογία Υλικών και Διατάξεων Στερεάς Κατάστασης

Δρ Χρήστος Τσάμης

Ινστιτούτο Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας

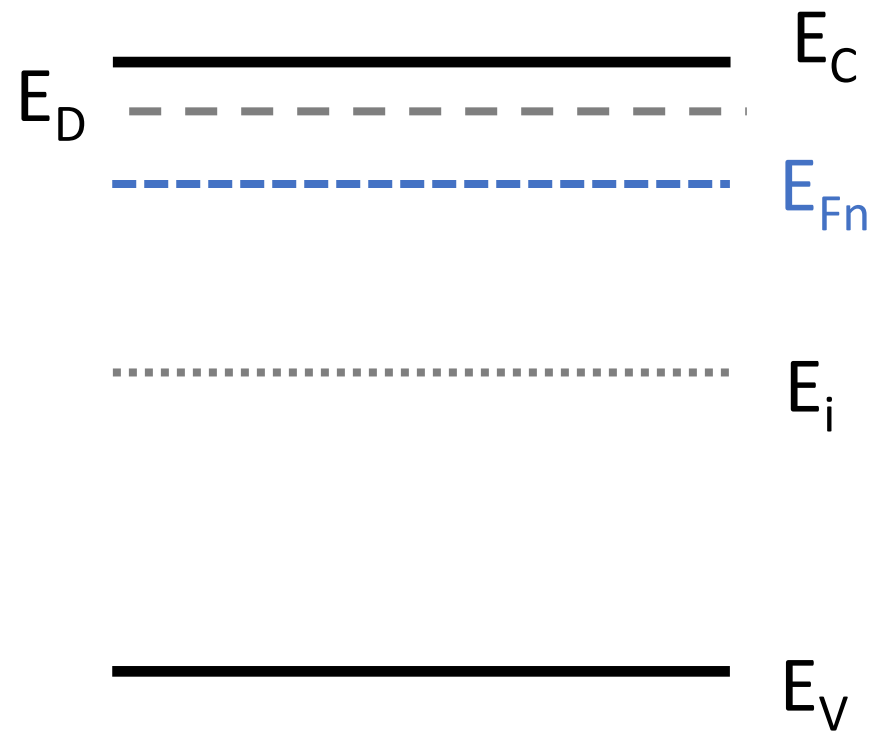
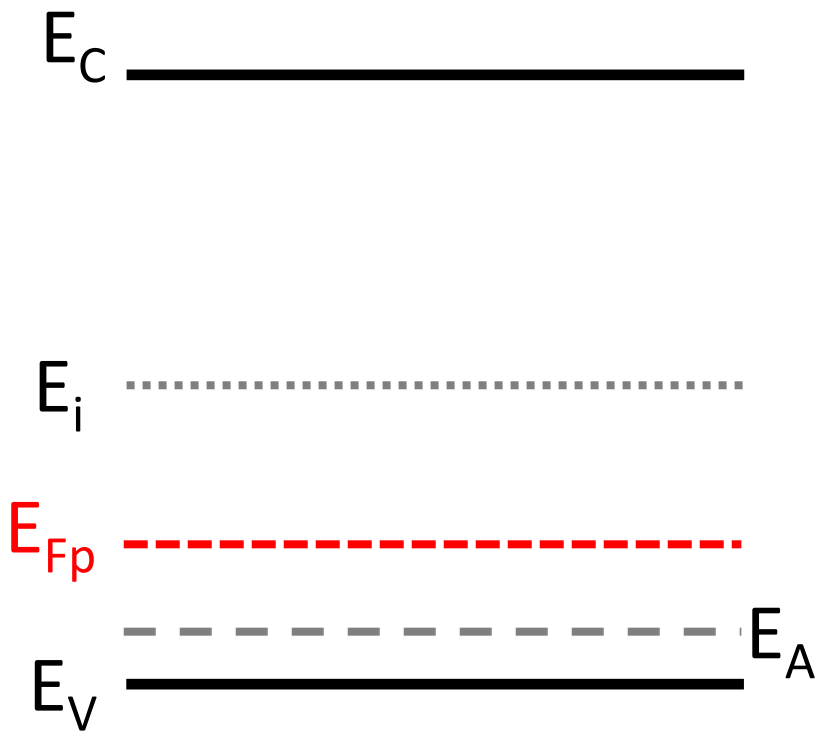
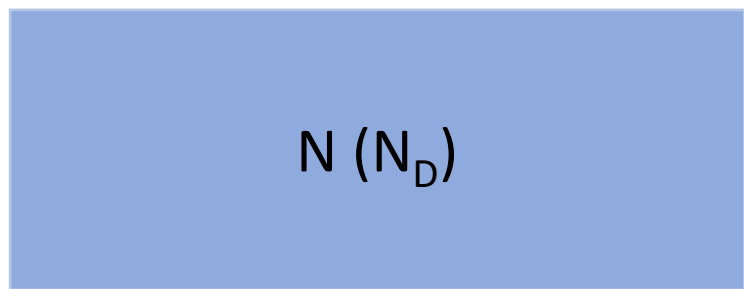
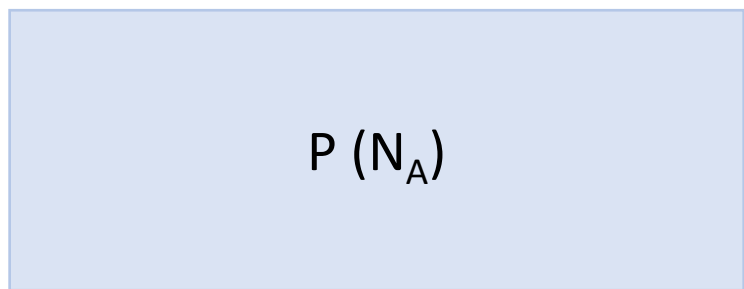
ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος»

c.tsamis@inn.demokritos.gr

Πάτρα, 2024

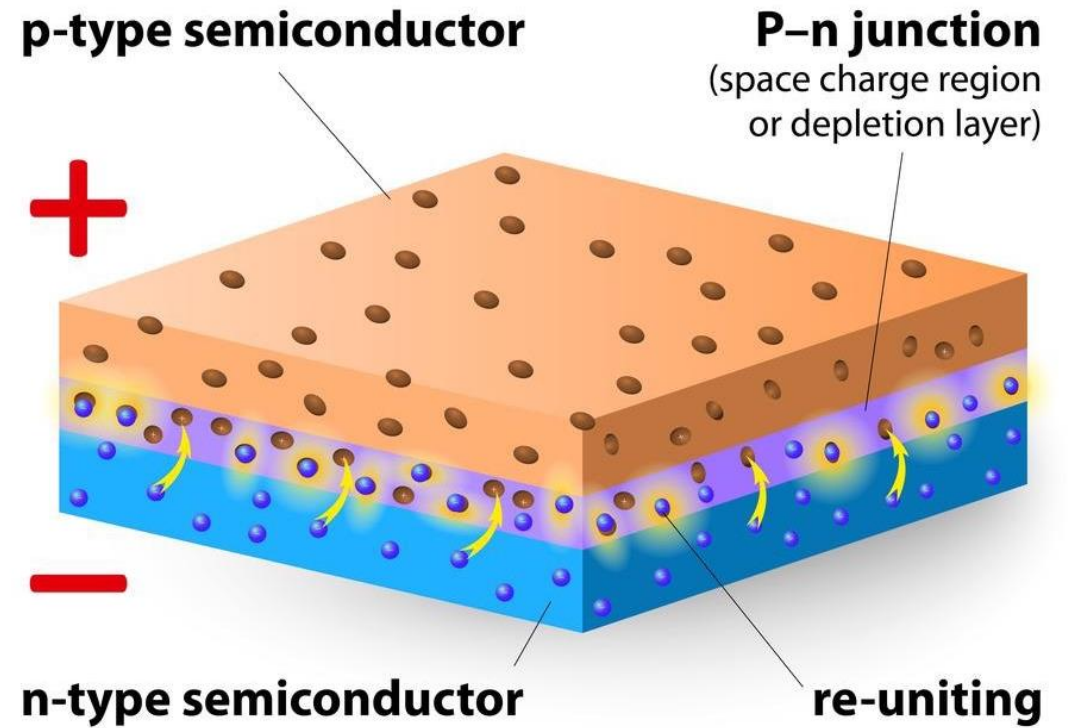
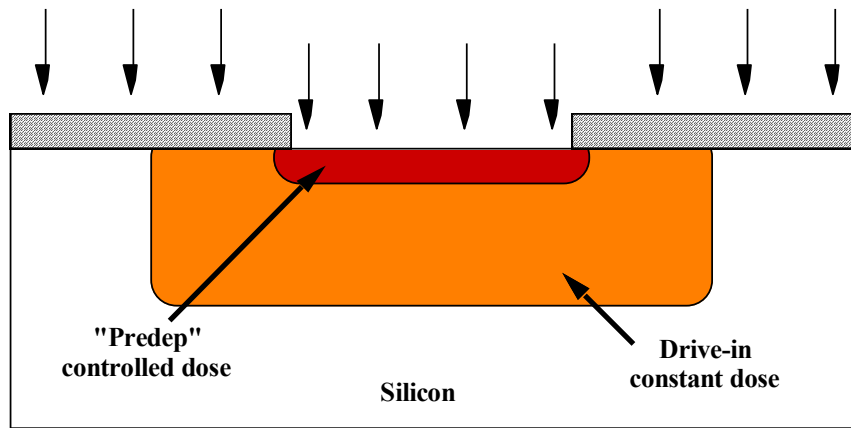
Η Επαφή p-n

D. A. Neamen, *Semiconductor Physics and Devices*
McGraw-Hill, 4th Ed. (2012)
Ενότητες 7.1-7.3, 7.5.1,
8.1 (εκτός 8.1.7), 8.2, 8.5

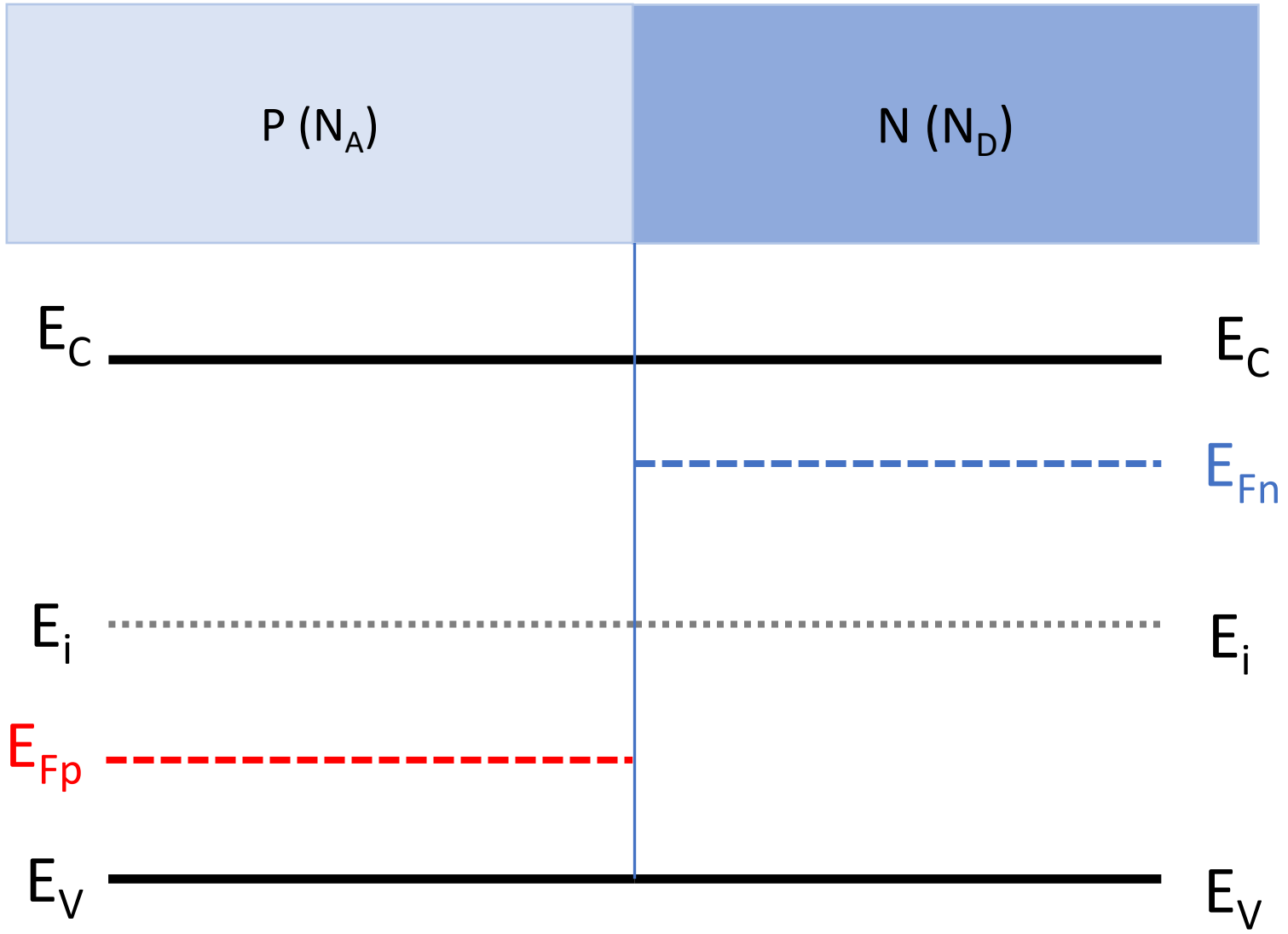


$P(N_A)$

$N(N_D)$



Τι θα συμβεί αν φέρουμε τους δύο ημιαγωγούς σε «επαφή»



Τι θα συμβεί αν φέρουμε τους δύο ημιαγωγούς σε «επαφή»



ΠΕΡΙΟΧΗ P

ΠΕΡΙΟΧΗ N

ρ_p : Majority carriers

n_n : Majority carriers

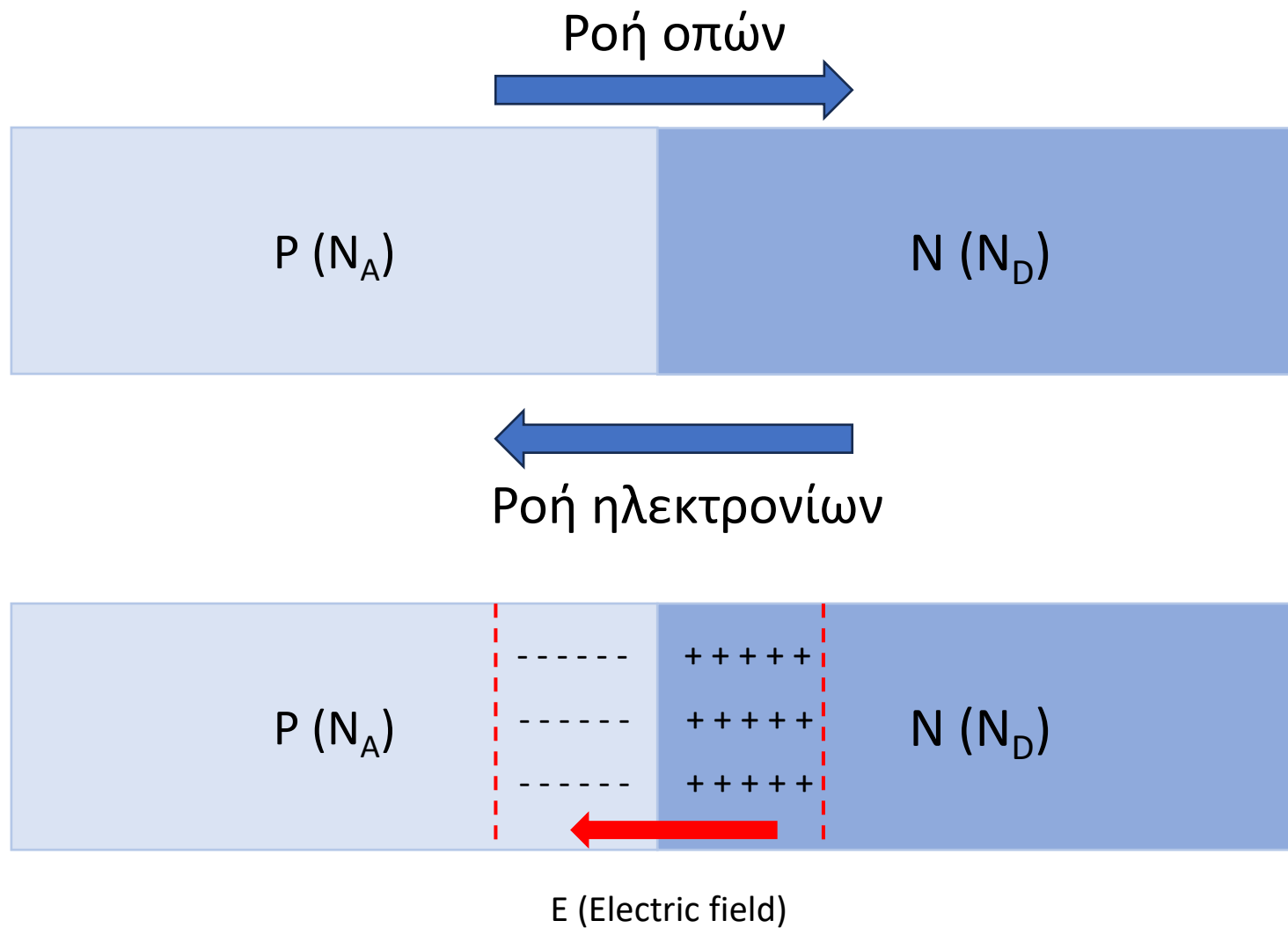
n_p : Minority carriers

ρ_n : Minority carriers

Εξαιτίας της διαφοράς συγκέντρωσης των φορέων θα υπάρξει:

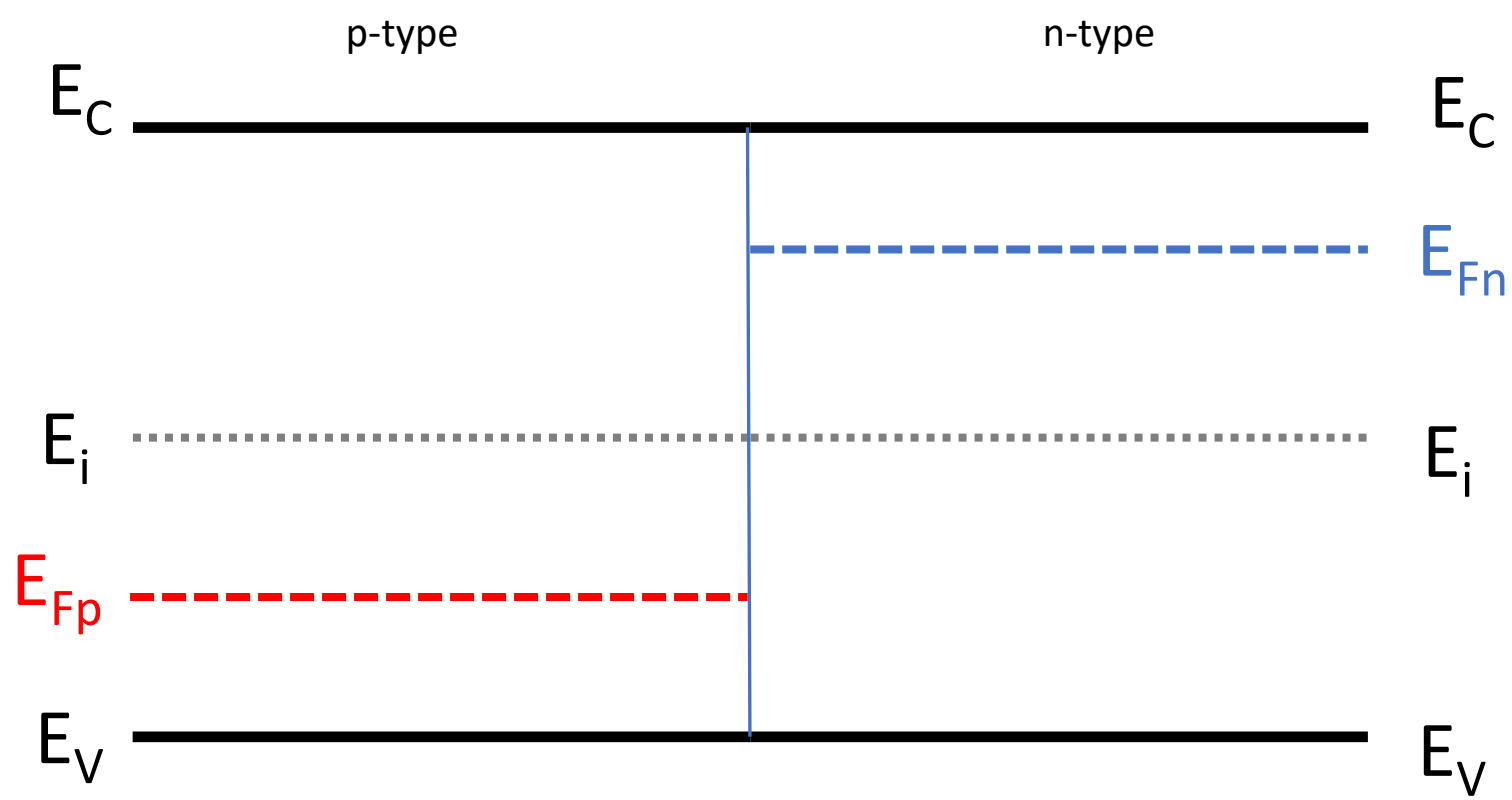
Ροή ηλεκτρονίων από την περιοχή n στην περιοχή p

Ροή οπών από την περιοχή p στην περιοχή n

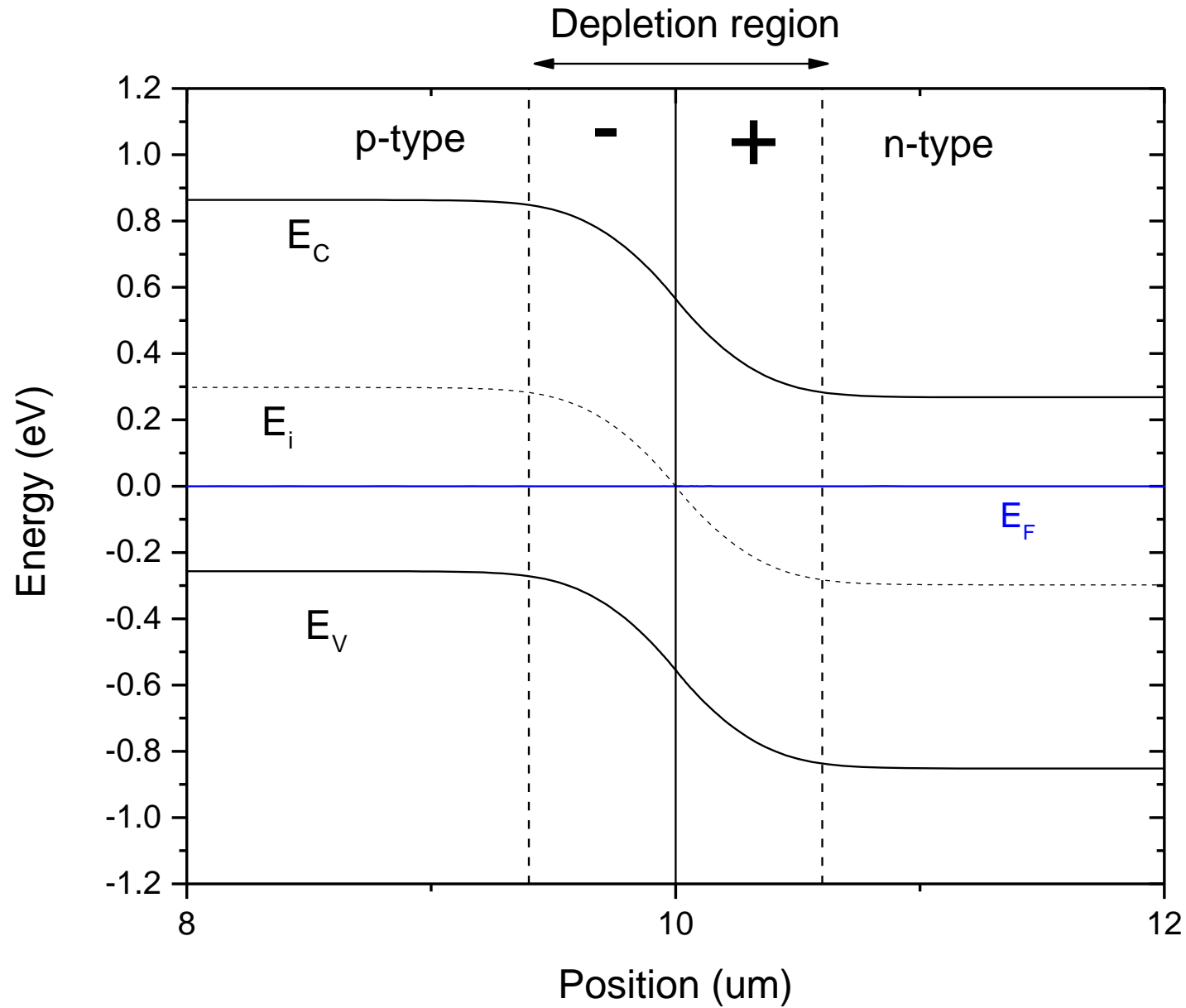


Σε Θ.Ι η διάχυση φορέων λόγω βαθμίδας συγκέντρωσης θα εξισορροπείται από την ολίσθηση των φορέων λόγω του ηλεκτρικού πεδίου

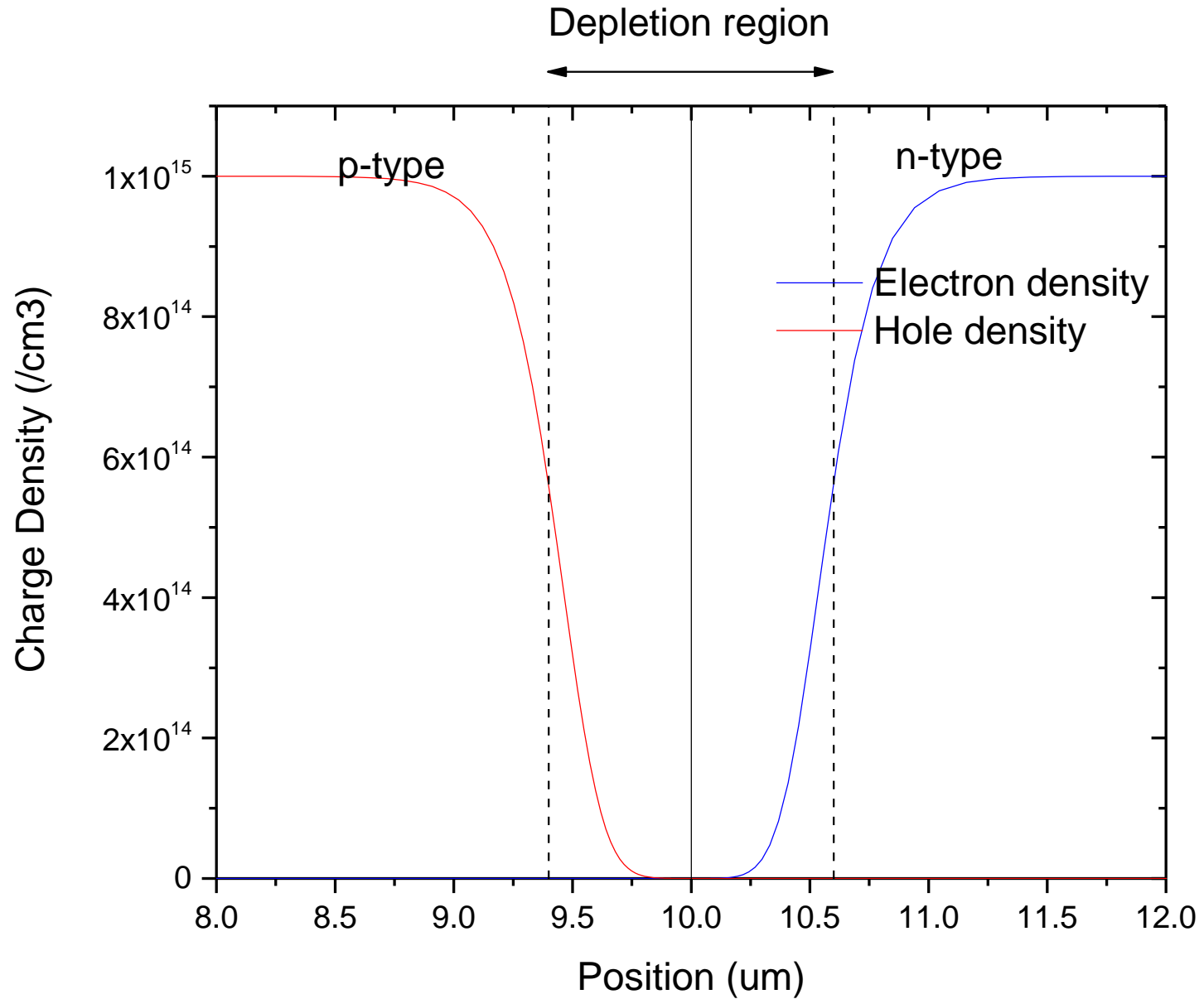
Τι θα συμβεί στο Ενεργειακό Επίπεδο



Σε κατάσταση Θ.Ι το σύστημα πρέπει να έχει μία Στάθμη Fermi

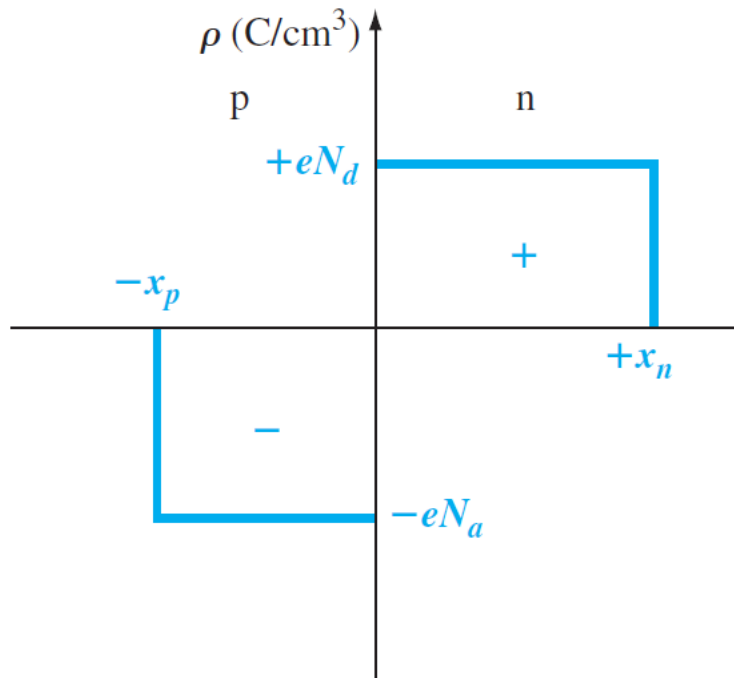


Συγκέντρωση φορέων

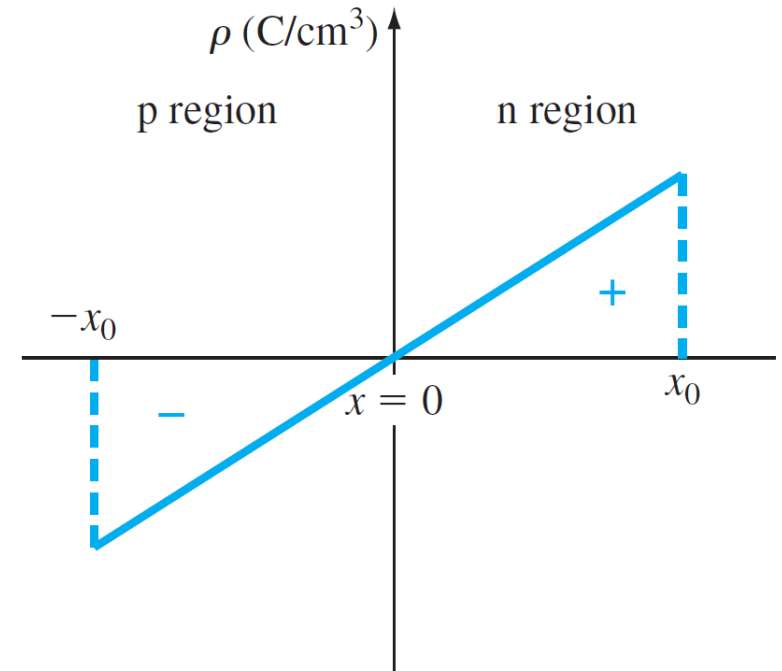


Αναλυτική επίλυση εξισώσεων για επαφή p-n

- Απότομη επαφή (Abrupt junction)
 - One sided junction



- Linearly graded junction



Σύνδεση ηλεκτρικού πεδίου με ενεργειακές στάθμες

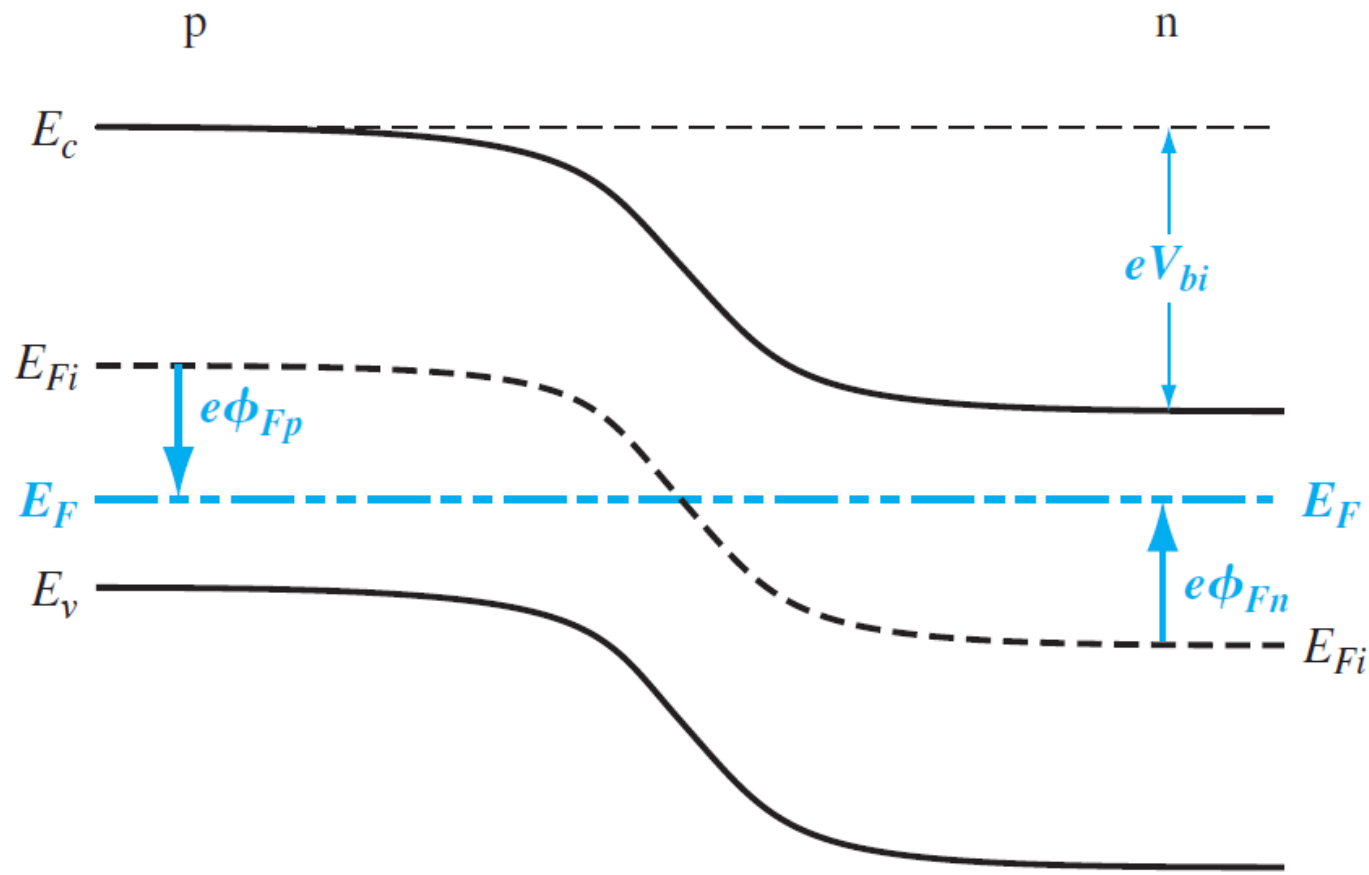
$$E_x = \frac{1}{q} \cdot \frac{dE_i}{dx}$$

$$E_x \equiv -\frac{d\varphi_i}{dx}$$

Ορισμός ηλεκτρικού δυναμικού σε ένα ημιαγωγό

$$\varphi_i = -\frac{E_i}{q}$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla} \varphi_i(\vec{r})$$



$$V_{bi} = |\Phi_{Fp}| + |\Phi_{Fn}|$$

Built in potential

Από τον ορισμό του δυναμικού έχω:

$$\varphi_i = -\frac{E_i}{q}$$

Θεωρώ σαν στάθμη αναφοράς του δυναμικού τη στάθμη Fermi

$$\varphi_{E_F} = 0$$

Ποια περιοχή έχει υψηλότερο δυναμικό?

Υπολογισμός V_{bi}

Περιοχή p

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right)$$

$$n = n_i \exp\left(\frac{(-q\varphi_i) - (-q\varphi_{E_F}(x))}{kT}\right)$$

Θεωρώντας ότι $\varphi_{E_F} = 0$

$$p = n_i \exp\left(-\frac{q\varphi_i(x)}{kT}\right)$$

Μακριά από την επαφή ισχύει

$$p = N_A$$

$$\varphi_i(x) = \varphi_{Fp}$$

$$N_A = n_i \exp\left(-\frac{q\varphi_{Fp}}{kT}\right)$$

Τελικά

$$\varphi_{Fp} = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

Υπολογισμός V_{bi}

Περιοχή n

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$$

$$n = n_i \exp\left(\frac{(-q\varphi_{E_F}) - (-q\varphi_i(x))}{kT}\right)$$

Θεωρώντας ότι $\varphi_{E_F} = 0$

$$n = n_i \exp\left(\frac{q\varphi_i(x)}{kT}\right)$$

Μακριά από την επαφή ισχύει

$$n = N_D$$

$$\varphi_i(x) = \varphi_{F_n}$$

$$N_D = n_i \exp\left(\frac{q\varphi_{F_n}}{kT}\right)$$

Τελικά

$$\varphi_{F_n} = +\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

Παρατηρούμε ότι

Περιοχή p

$$\varphi_{F_p} = -\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) <$$

Περιοχή n

$$\varphi_{F_n} = +\frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

Αυτό είναι λογικό καθώς το ηλεκτρικό πεδίο έχει κατεύθυνση από την περιοχή n προς την περιοχή p

Τελικά

$$V_{bi} = |\Phi_{F_p}| + |\Phi_{F_n}|$$

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

V_T : Thermal voltage

Αναλυτική επίλυση εξισώσεων για επαφή p-n

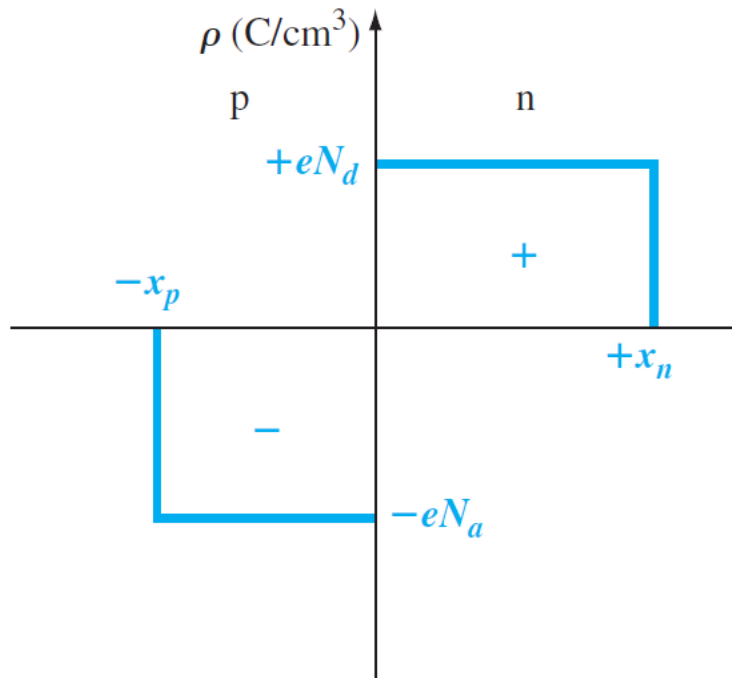
- Abrupt junction

Εφαρμόζω την εξίσωση του Poisson

$$\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = -\frac{dE(x)}{dx}$$

$$\rho(x) = -eN_A, \quad -x_p < x < 0$$

$$\rho(x) = eN_D, \quad 0 < x < x_n$$



$$E = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} dx$$

Ηλεκτρικό πεδίο

p-region

$$E(x) = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} dx = - \int \frac{-eN_A}{\epsilon_s} dx = -\frac{eN_A}{\epsilon_s} x + C_1$$

Από την συνοριακή συνθήκη $E(x=-x_p)=0$, βρίσκω το C_1

$$E = -\frac{eN_A}{\epsilon_s} (x + x_p)$$
$$-x_p \leq x \leq 0$$

n-region

$$E(x) = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} dx = - \int \frac{eN_D}{\epsilon_s} dx = \frac{eN_D}{\epsilon_s} x + C_2$$

Από την συνοριακή συνθήκη $E(x=x_n)=0$, βρίσκω το C_2

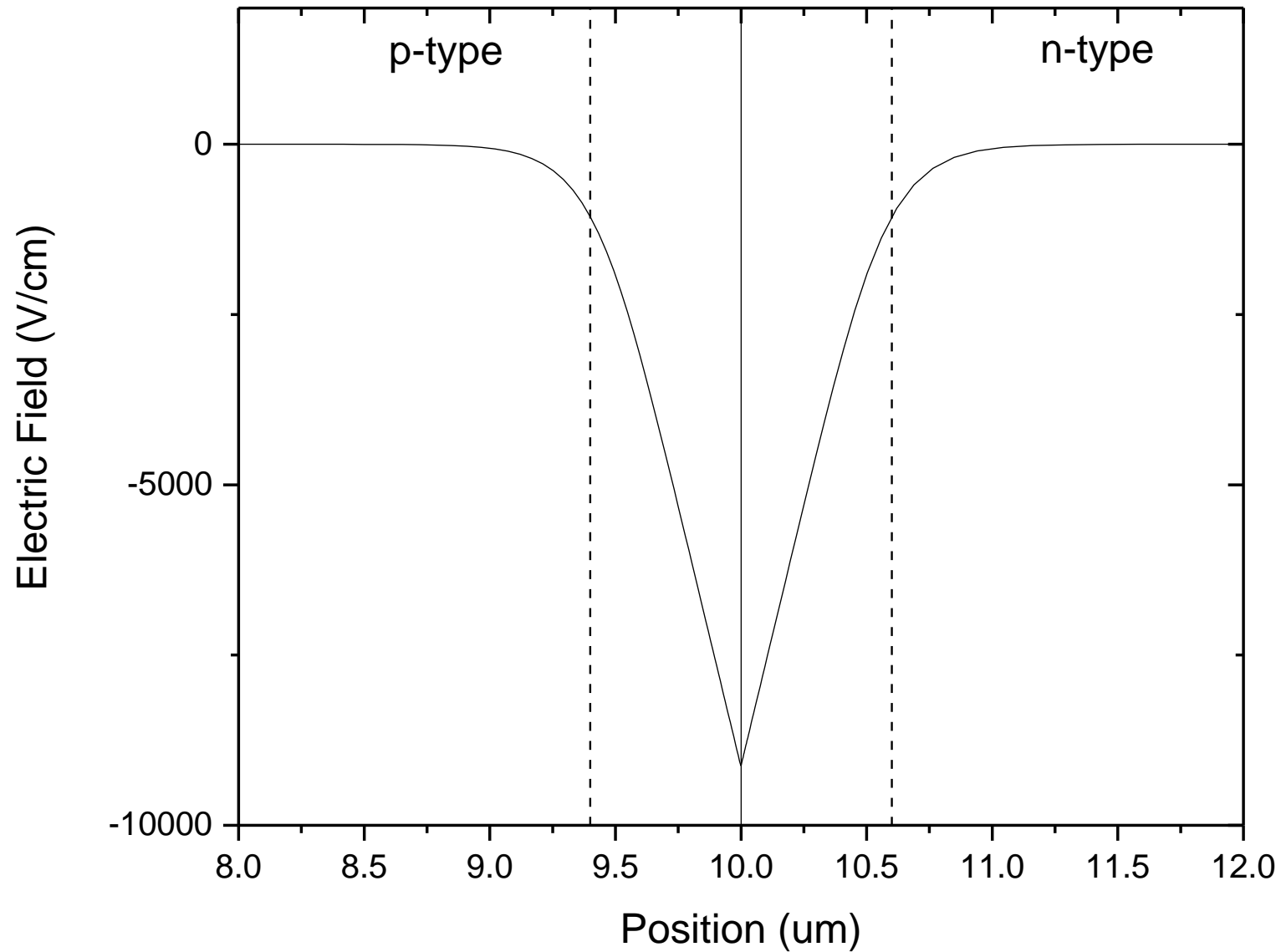
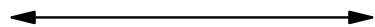
$$E = -\frac{eN_D}{\epsilon_s} (x_n - x)$$
$$0 \leq x \leq x_p$$

Για $x=0$ οι δύο σχέσεις για το E δίνουν το ίδιο αποτέλεσμα και ισχύει:

$$N_A x_p = N_D x_n$$

Ηλεκτρικό πεδίο

Depletion region



Ηλεκτρικό δυναμικό

p-region

$$\varphi(x) = - \int E(x) dx = \int \frac{eN_A}{\epsilon_s} (x + x_p) dx = \frac{eN_A}{\epsilon_s} \left(\frac{x^2}{2} + x_p x \right) + D_1$$

Από την συνοριακή συνθήκη $\varphi(x=-x_p)=0$, βρίσκω το D_1

$$\varphi(x) = \frac{eN_A}{\epsilon_s} (x + x_p)^2$$
$$-x_p \leq x \leq 0$$

n-region

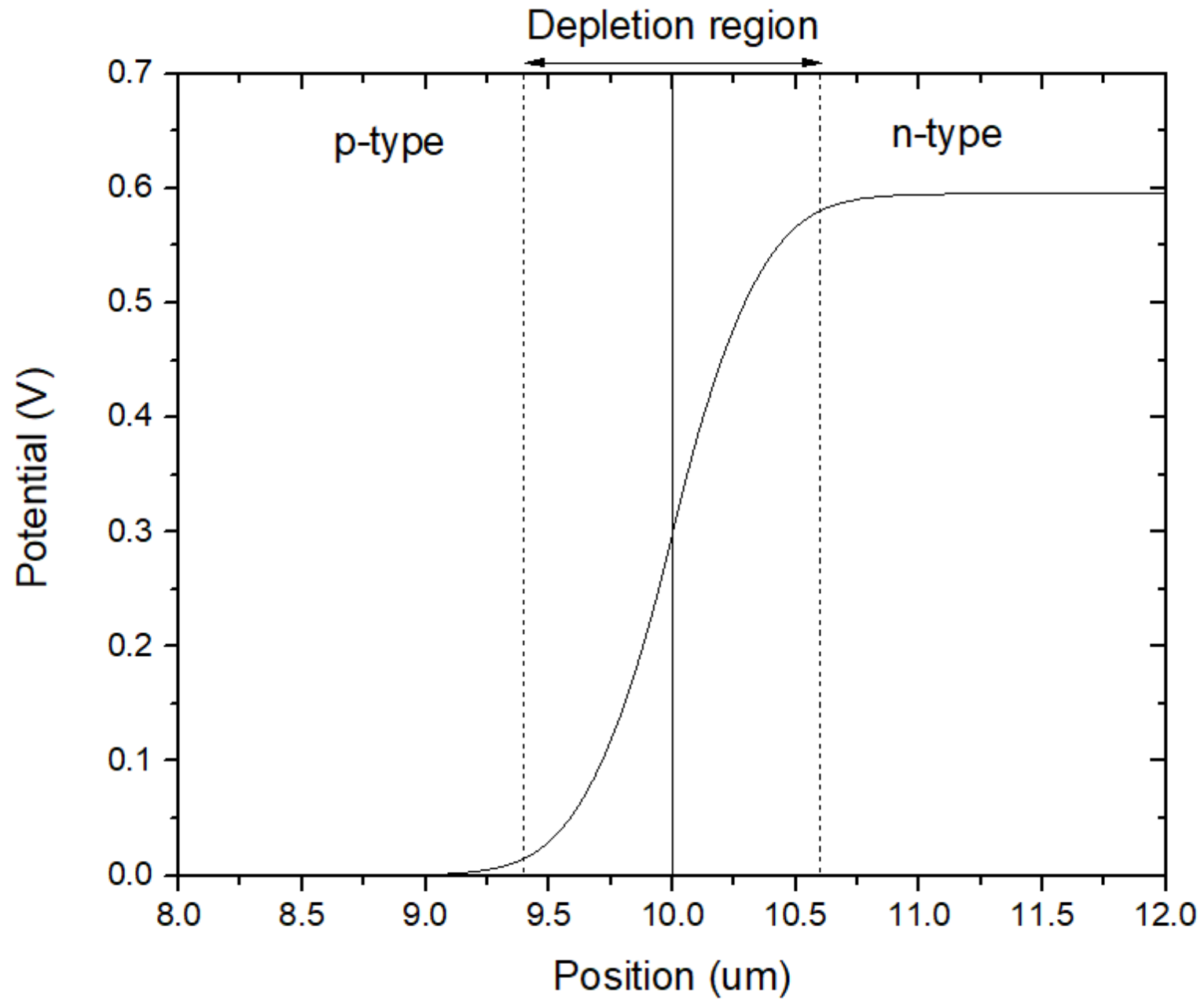
$$\varphi(x) = - \int E(x) dx = \int \frac{eN_D}{\epsilon_s} ((x_n - x)) dx = \frac{eN_D}{\epsilon_s} \left(x_n x - \frac{x^2}{2} \right) + D_2$$

Από τη συνέχεια του δυναμικού στη θέση $x=0$, βρίσκω το D_2

$$\varphi(x) = \frac{eN_D}{\epsilon_s} \left(x_n x - \frac{x^2}{2} \right) + \frac{eN_A}{2\epsilon_s} x_p^2$$
$$0 \leq x \leq x_n$$

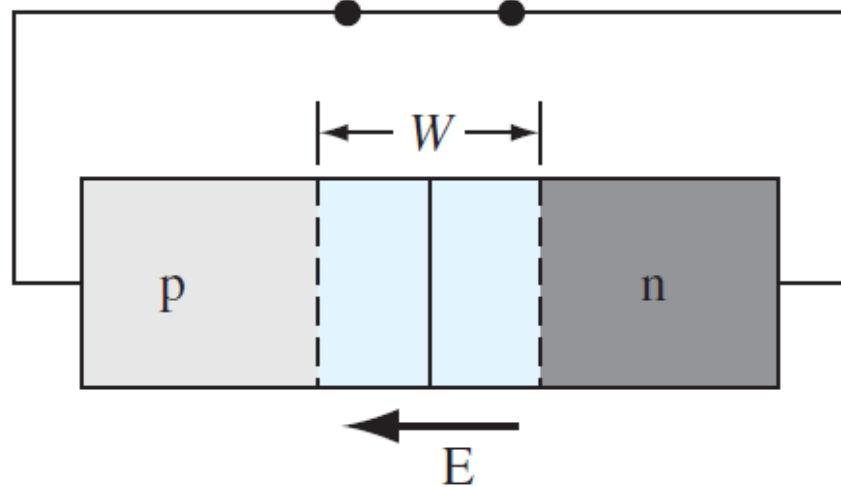
Ισχύει ότι: $\varphi(x = x_n) - \varphi(x = -x_p) = V_{bi}$

Ηλεκτρικό δυναμικό

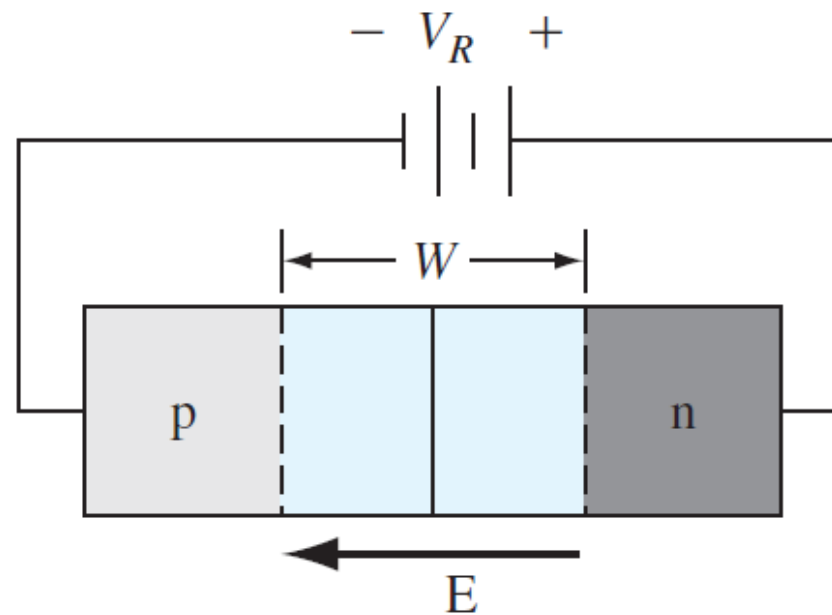


Ανάστροφη πόλωση επαφής pn (Reverse applied bias)

$V=0$ (συνθήκες $\Theta.I$)

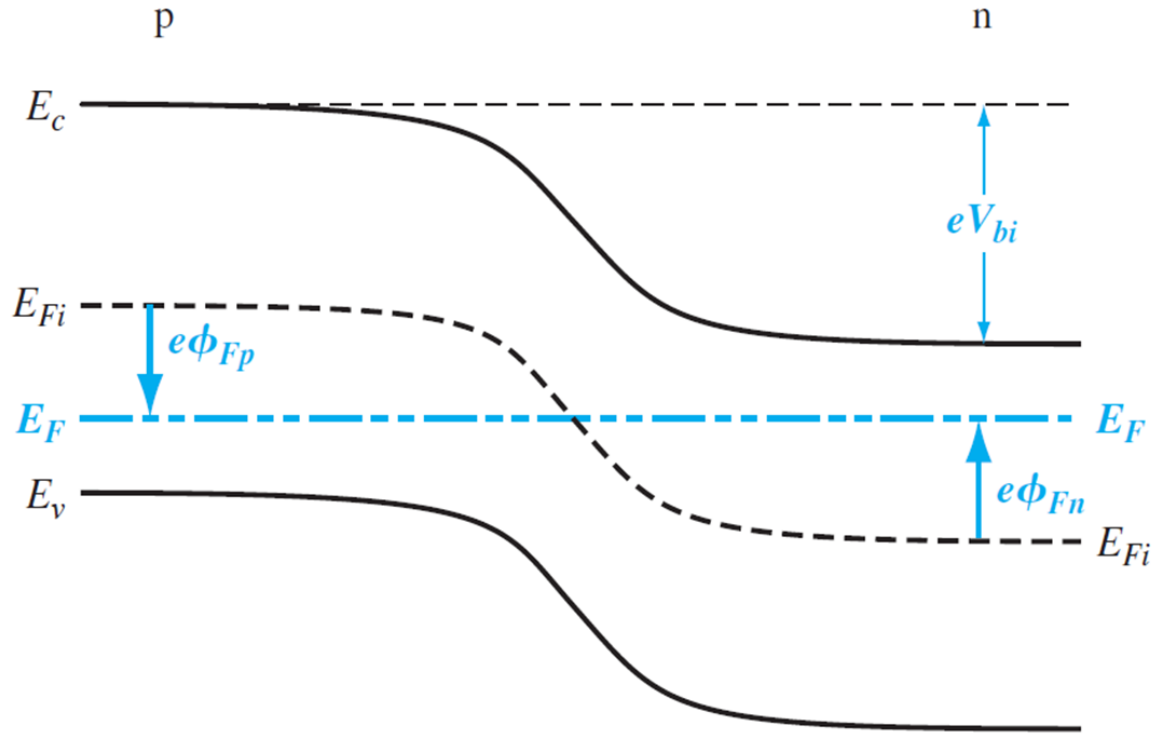


$V_R < 0$ ($V_p < V_n$) – Όχι συνθήκες $\Theta.I$



Ανάστροφη πόλωση επαφής pn (Reverse applied bias)

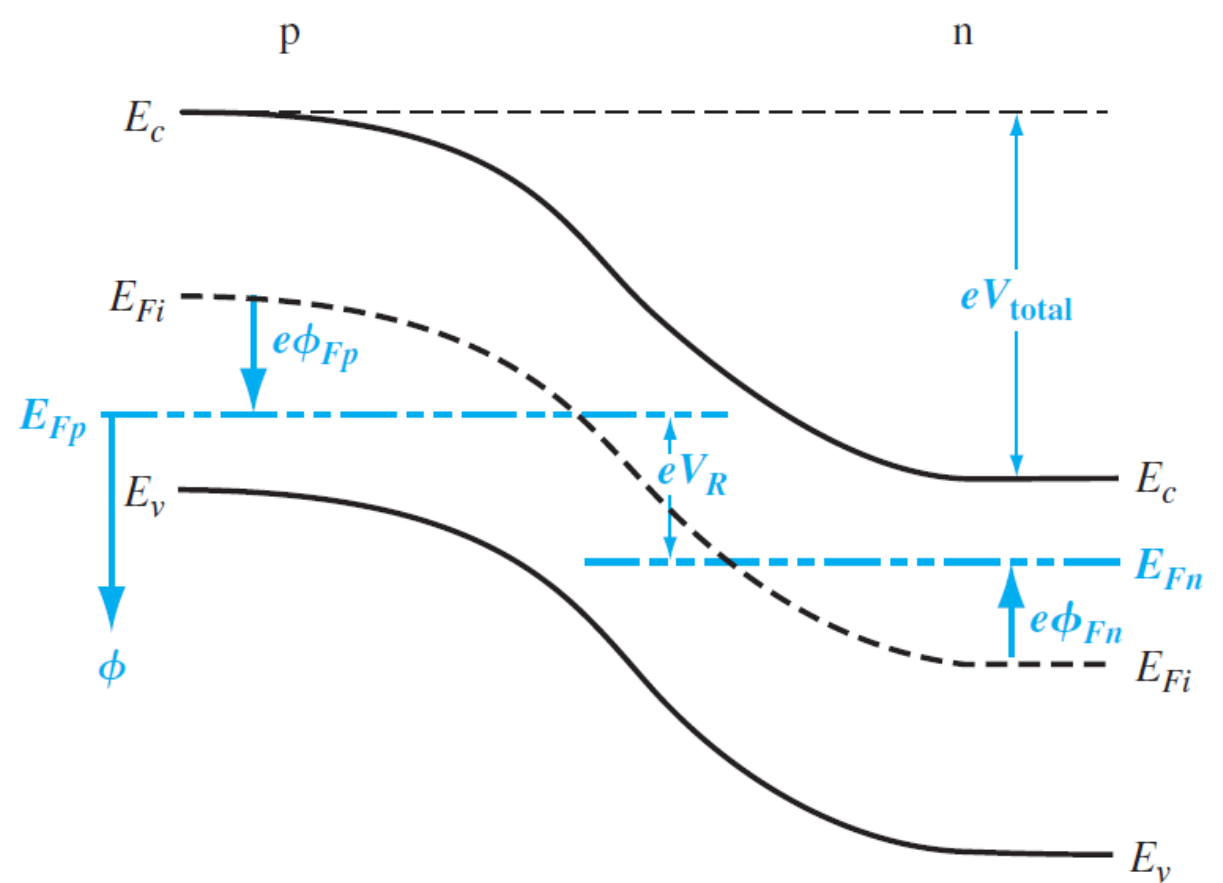
$V=0$ (συνθήκες Θ.Ι)



$$V_{bi} = |\Phi_{Fp}| + |\Phi_{Fn}|$$

Built in potential

$V_R < 0$ ($V_p < V_n$) – Όχι συνθήκες Θ.Ι



$$V_{Total} = |\Phi_{Fp}| + |\Phi_{Fn}| + V_R = V_{bi} + V_R$$

Ανάστροφη πόλωση επαφής pn (Reverse applied bias)

E_{pp} : Εφαρμοζόμενο πεδίο

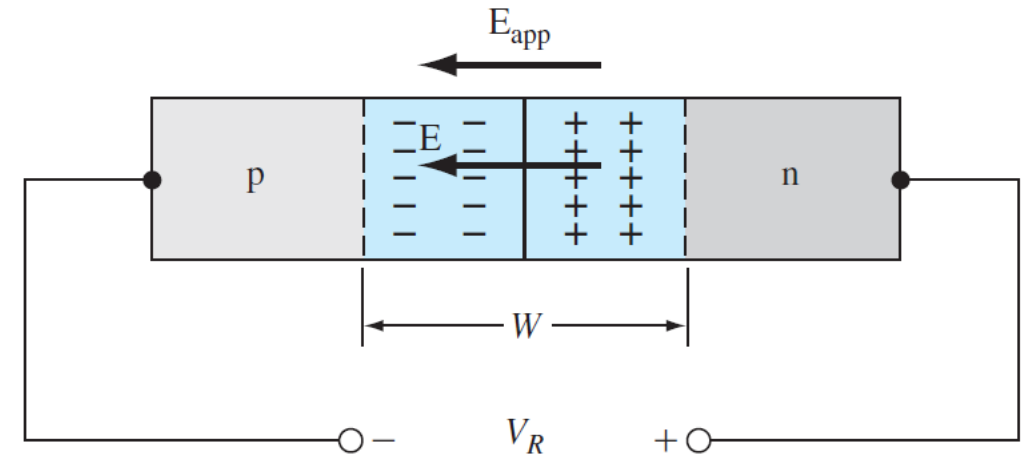
E : Πεδίο στη περιοχή φορτίου χώρου (SCR)

Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το ηλεκτρικό πεδίο στις ουδέτερες n και p περιοχές είναι πρακτικά μηδέν ή πολύ μικρό

Αυτό σημαίνει ότι το πεδίο E στην SCR θα αυξηθεί σε σχέση με τη Θ.Ι.

Αλλά το πεδίο προέρχεται από την κατανομή φορτίων στη SCR. Οπότε ο αριθμός των φορτίων πρέπει να αυξηθεί.

Αυτό μπορεί να γίνει μόνο αν αυξηθεί το εύρος της SCR.



$$W = \left\{ \frac{2\epsilon_s (V_{bi} + V_R)}{e} \left[\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Ανάστροφη πόλωση επαφής pn (Reverse applied bias)

E: Πεδίο στη περιοχή φορτίου χώρου (SCR)

Το ηλεκτρικό πεδίο αυξάνει όσο αυξάνει η ανάστροφη πόλωση

Η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου εξακολουθεί να είναι στη μεταλλουργική επαφή και δίνεται από τις σχέσεις

$$E_{max} = \frac{-eN_D x_n}{\epsilon_s} = \frac{-eN_A x_p}{\epsilon_s}$$

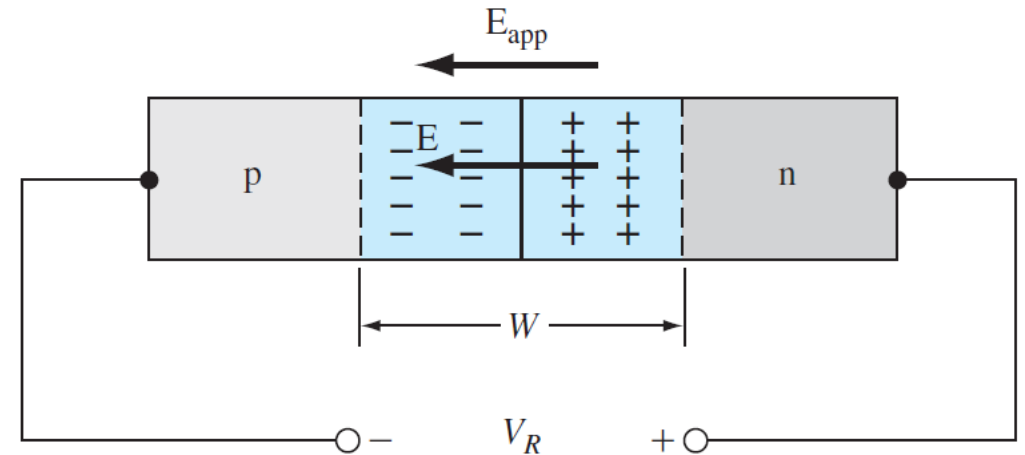
Μπορούμε να δείξουμε ότι

$$E_{max} = - \left\{ \frac{2e(V_{bi} + V_R)}{\epsilon_s} \left[\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

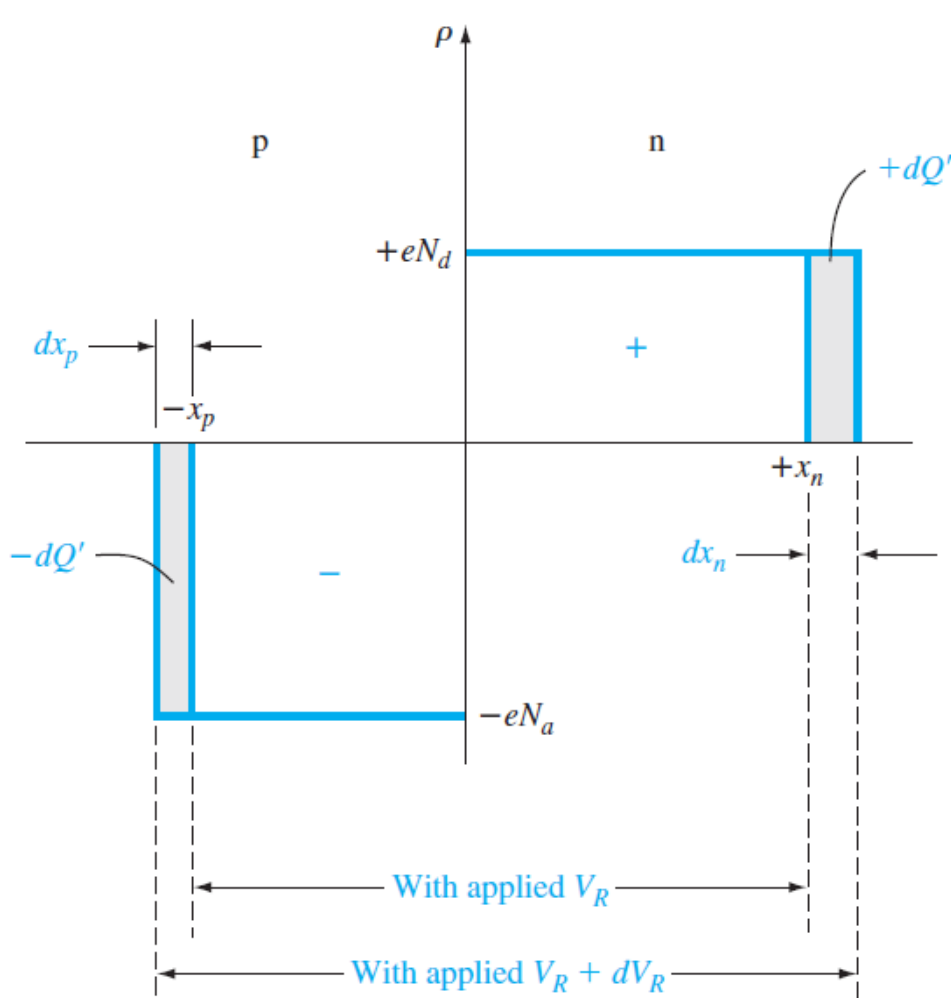


$$E_{max} = \frac{-2N_D(V_{bi} + V_R)}{W}$$

E_{max} : Αυξάνει γραμμικά με το V_R



Χωρητικότητα επαφής (Junction Capacitance)



$$C = \frac{dQ}{dV_R}$$

$$C = eN_D \frac{dx_n}{dV_R}$$

$$dQ = eN_D dx_n = eN_A dx_p$$

Από τη σχέση για το W (πλάτος SCR) βρίσκουμε ότι

$$x_n = \left\{ \frac{2\varepsilon_s(V_{bi} + V_R)}{e} \left[\frac{N_A}{N_D} \right] \left[\frac{1}{N_A + N_D} \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

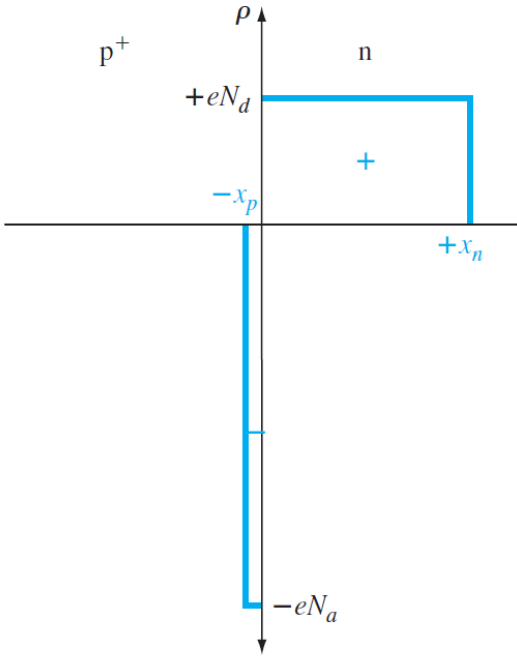
Τελικά

$$C = \left\{ \frac{e\varepsilon_s N_A N_D}{2(V_{bi} + V_R)(N_A + N_D)} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

One-Sided Junction

Είναι μία ειδική περίπτωση της απότομης επαφής όταν:

$$N_A \gg N_D \text{ (p}^+\text{n)} \quad \text{ή} \quad N_A \ll N_D \text{ (n}^+\text{p)}$$

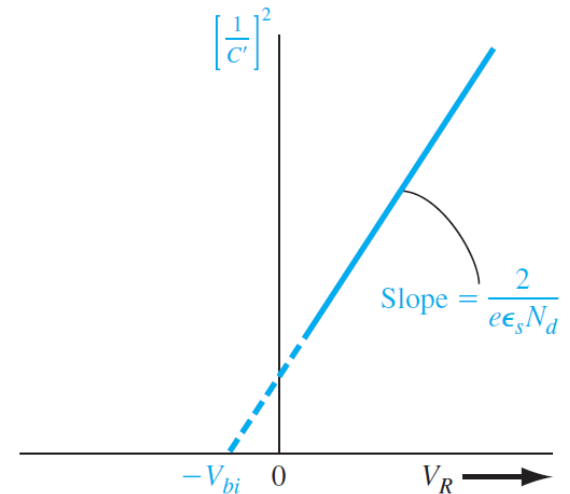


$$W = \left\{ \frac{2\varepsilon_s(V_{bi} + V_R)}{e} \left[\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \xrightarrow{N_A \gg N_D} \quad W = \left\{ \frac{2\varepsilon_s(V_{bi} + V_R)}{e N_D} \right\}^{\frac{1}{2}}$$

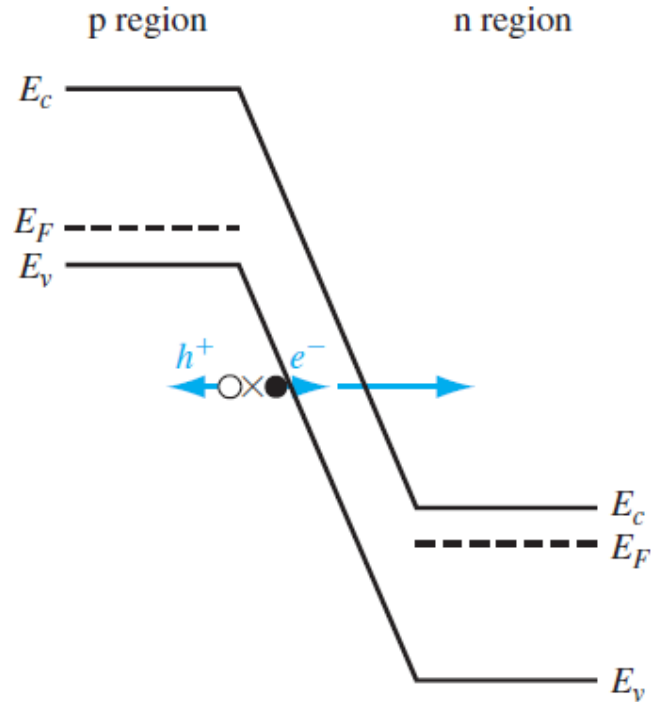
$$\left. \begin{aligned} W &= x_n + x_p \\ N_A x_p &= N_D x_n \end{aligned} \right\} x_n \gg x_p \quad W = x_n$$

Χωρητικότητα επαφής

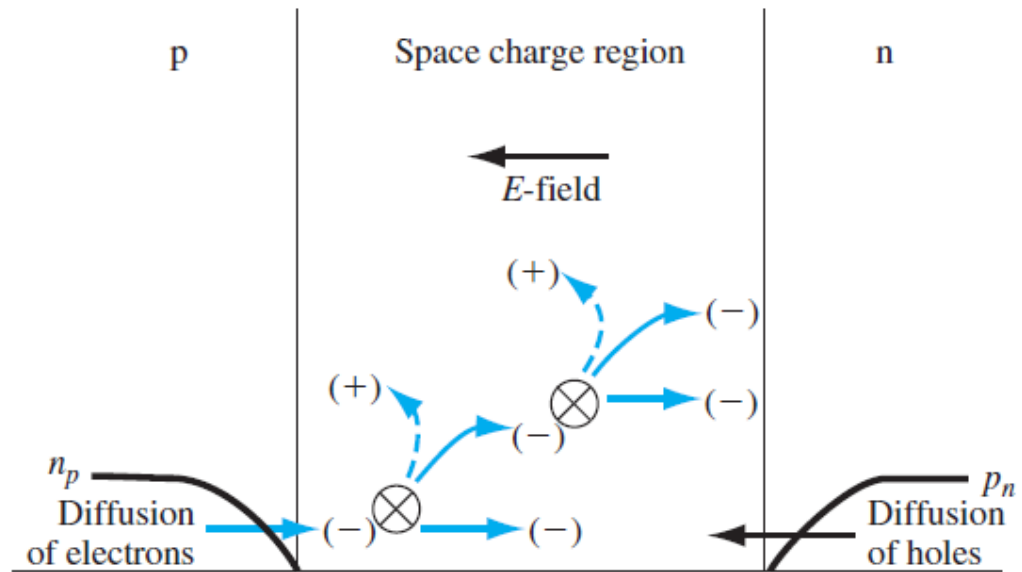
$$C = \left\{ \frac{e\varepsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_R)} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad \xrightarrow{\quad} \quad \left(\frac{1}{C} \right)^2 = \frac{2(V_{bi} + V_R)}{e\varepsilon_s N_D}$$



Junction breakdown (Reverse bias)

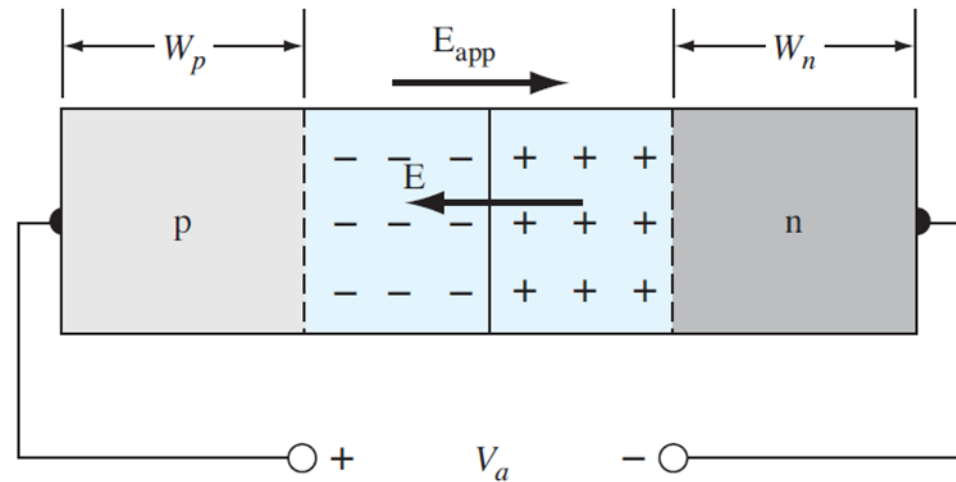
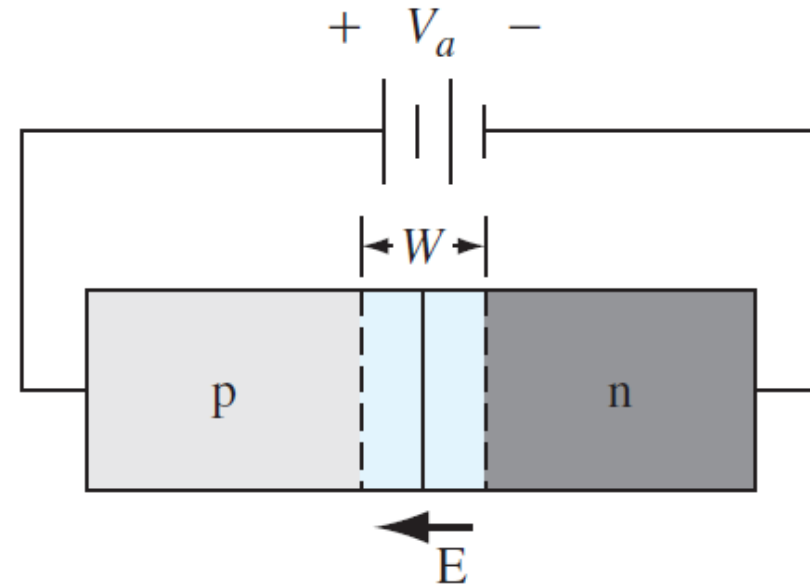
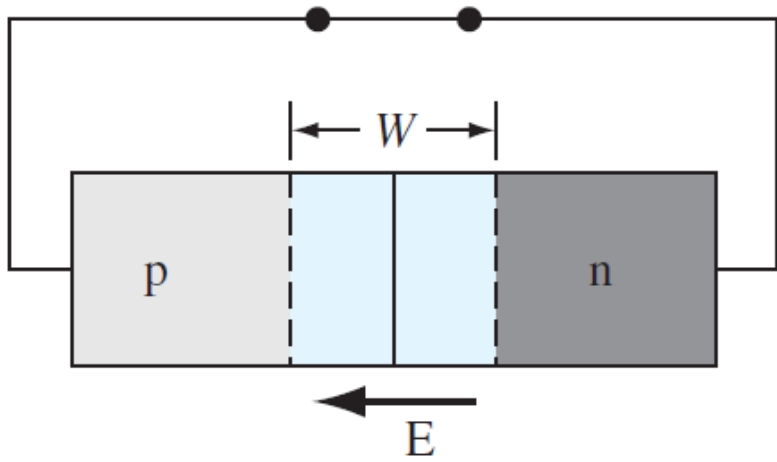


Μηχανισμός Zener



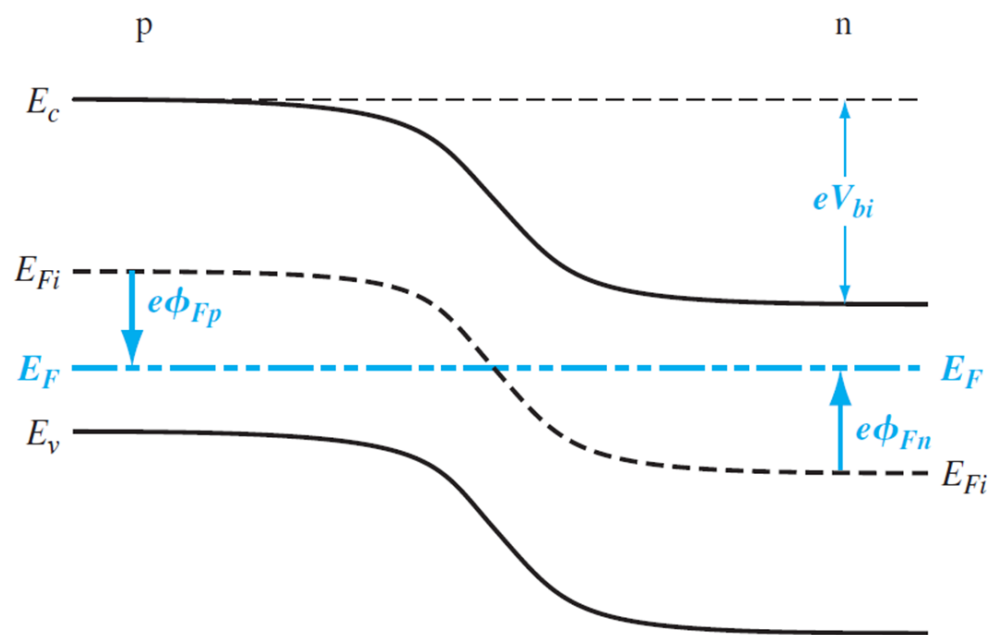
Avalanche breakdown

Ορθή πόλωση επαφής pn (Forward applied bias)

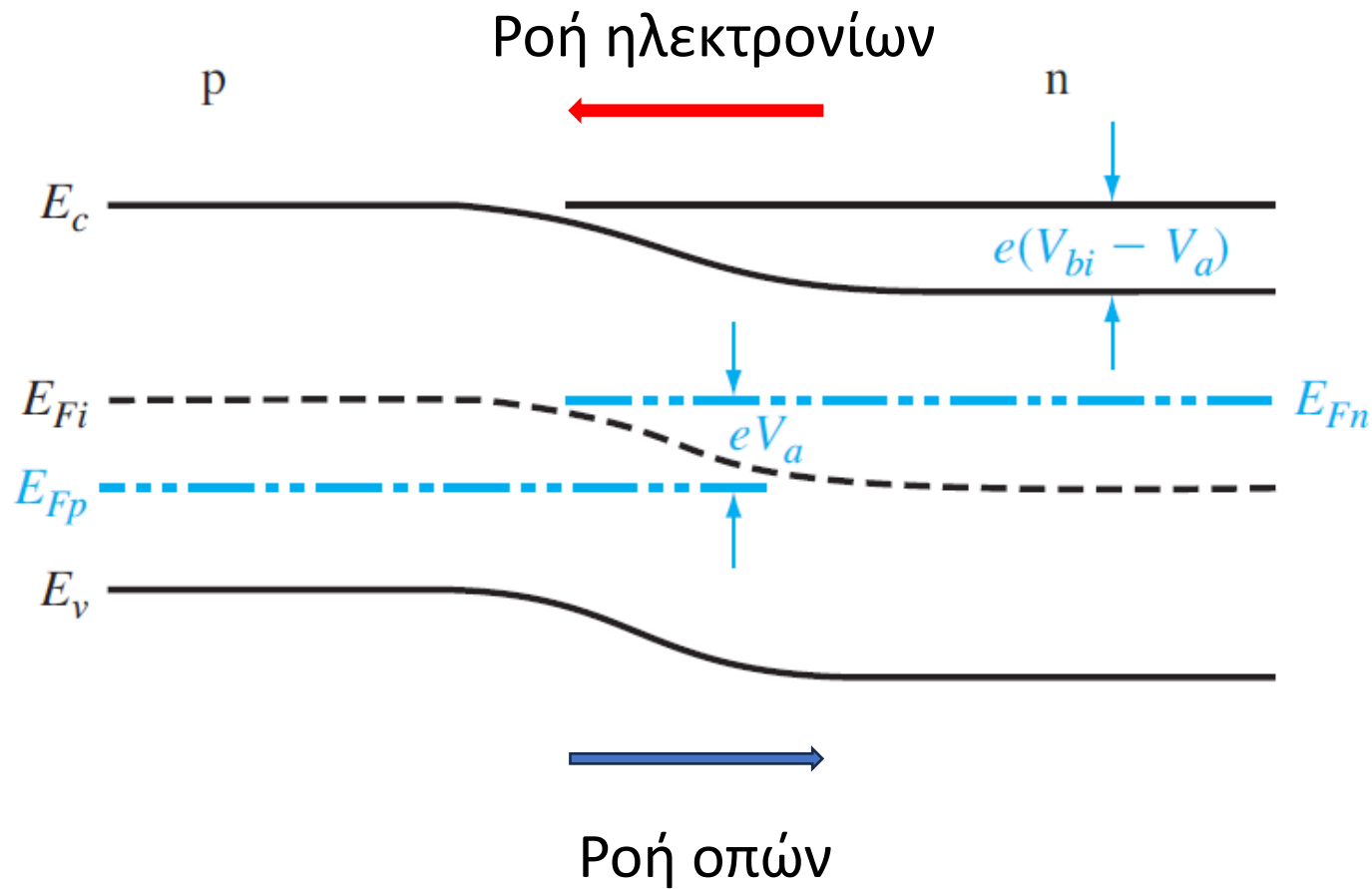


Ορθή πόλωση (Forward bias)

$V=0$ (Θ.Ι)

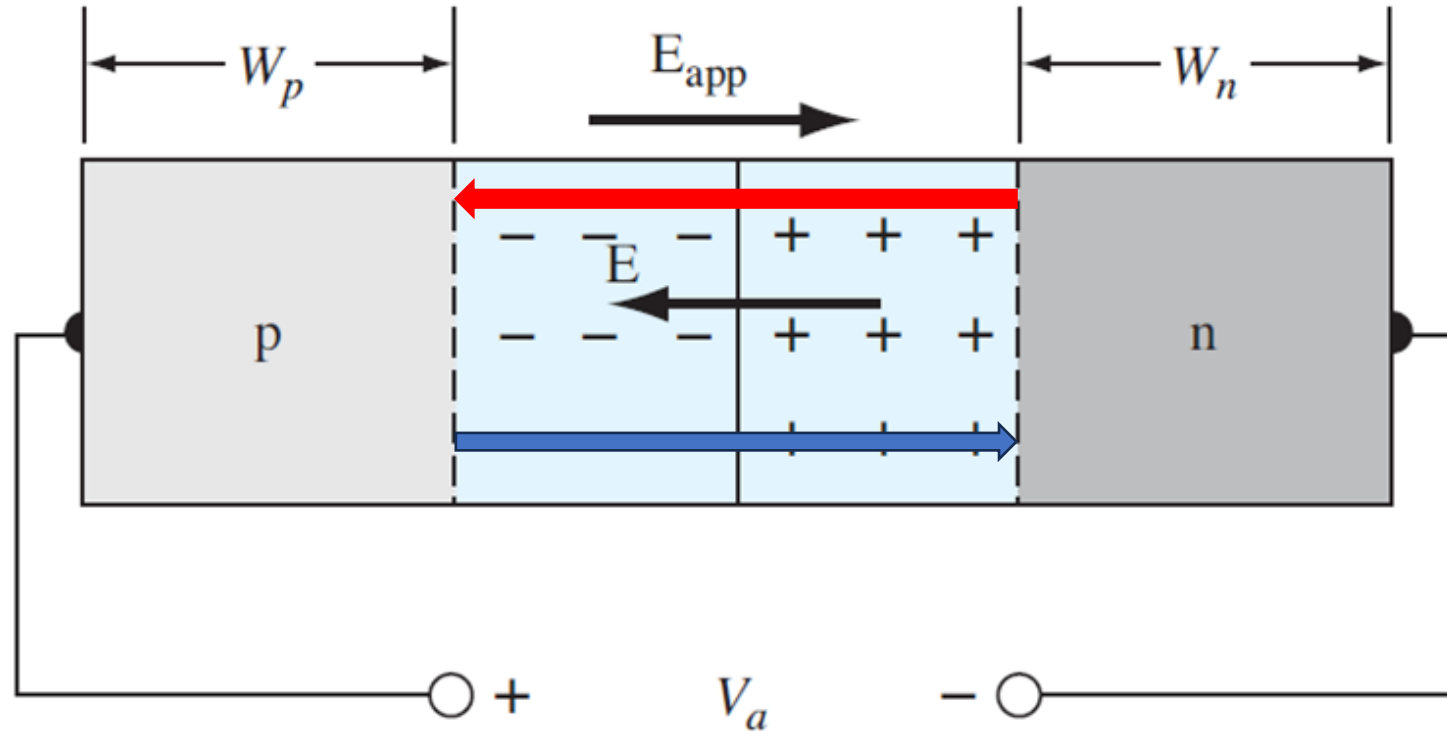


$V>0$ ($V_p>V_n$)



Ορθή πόλωση επαφής pn (Forward applied bias)

Ροή e από την n στην p : Τα e διαχέονται στην p (minority carrier)



Ροή h από την p στην n : Οι h διαχέονται στην n (minority carrier)

Έχουμε υποθέσει ότι το E στις περιοχές n , p είναι αμελητέο

Ορθή πόλωση επαφής pn (Forward applied bias)

Δείξαμε ότι

$$V_{bi} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) = V_T \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad \longrightarrow \quad \frac{n_i^2}{N_A N_D} = \exp \left(-\frac{eV_{bi}}{kT} \right)$$

Θεωρώντας πλήρη ιονισμό και στατιστική Boltzmann, σε Θ.Ι ισχύει

Περιοχή p

$$p_{po} = N_A$$

$$n_{po} = \frac{n_i^2}{N_A}$$

Περιοχή n

$$n_{no} = N_D$$

$$p_{no} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$\frac{n_{po}}{n_{no}} = \exp \left(-\frac{eV_{bi}}{kT} \right)$$

$$n_{po} = n_{no} \cdot \exp \left(-\frac{eV_{bi}}{kT} \right)$$

Ορθή πόλωση επαφής pn (Forward applied bias)

Όταν εφαρμόζουμε μία εξωτερική τάση V_a

$$n_{p0} = n_{n0} \cdot \exp\left(-\frac{eV_{bi}}{kT}\right) \quad \longrightarrow \quad n_p = n_{n0} \cdot \exp\left(-\frac{e(V_{bi} - V_a)}{kT}\right) \quad \longrightarrow$$

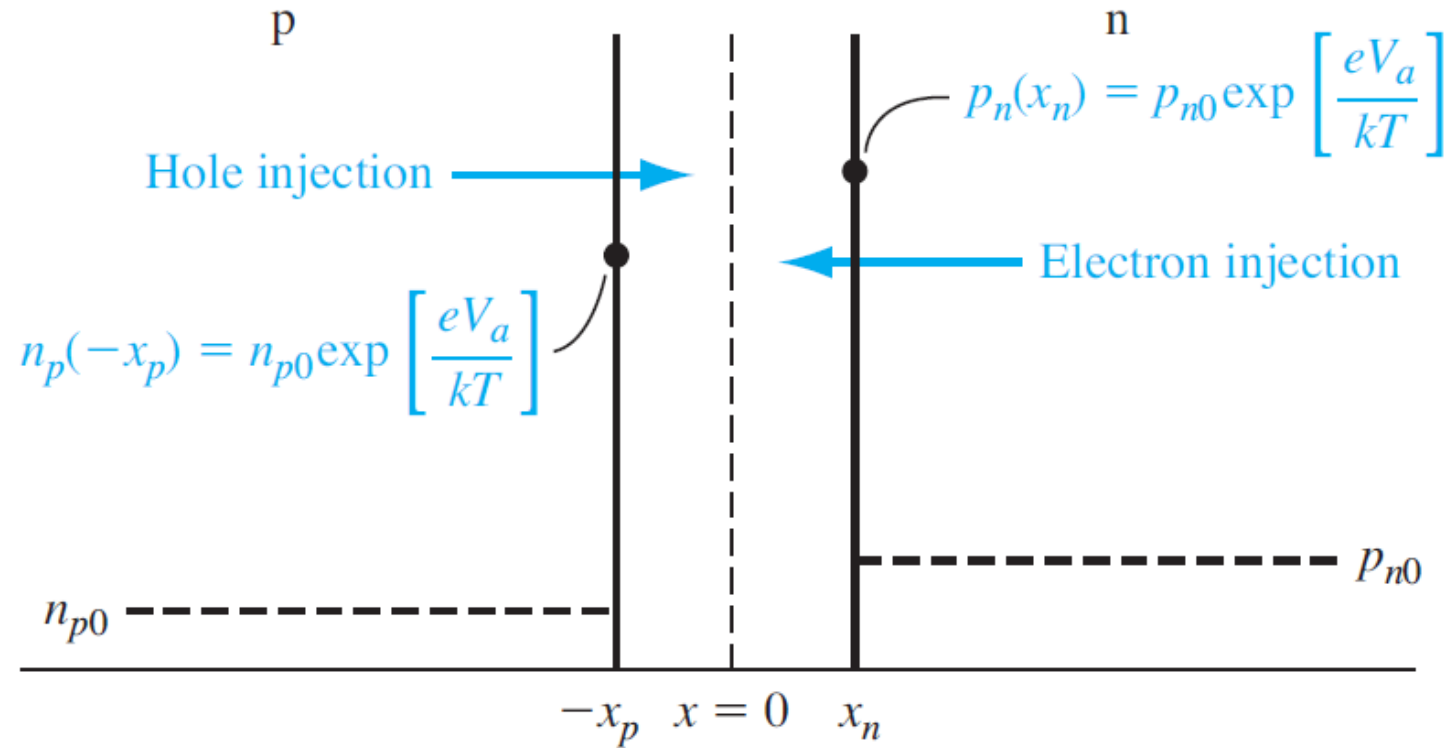
$$n_p = n_{n0} \cdot \exp\left(-\frac{eV_{bi}}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) \quad \longrightarrow \quad n_p = n_{p0} \cdot \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$$

n_{p0}

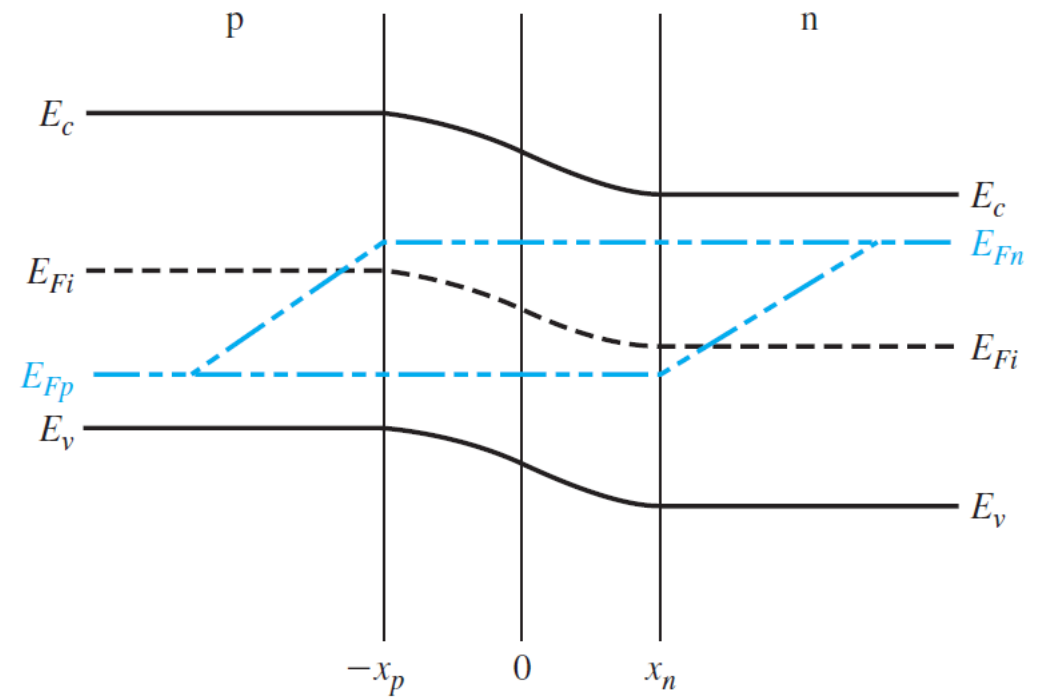
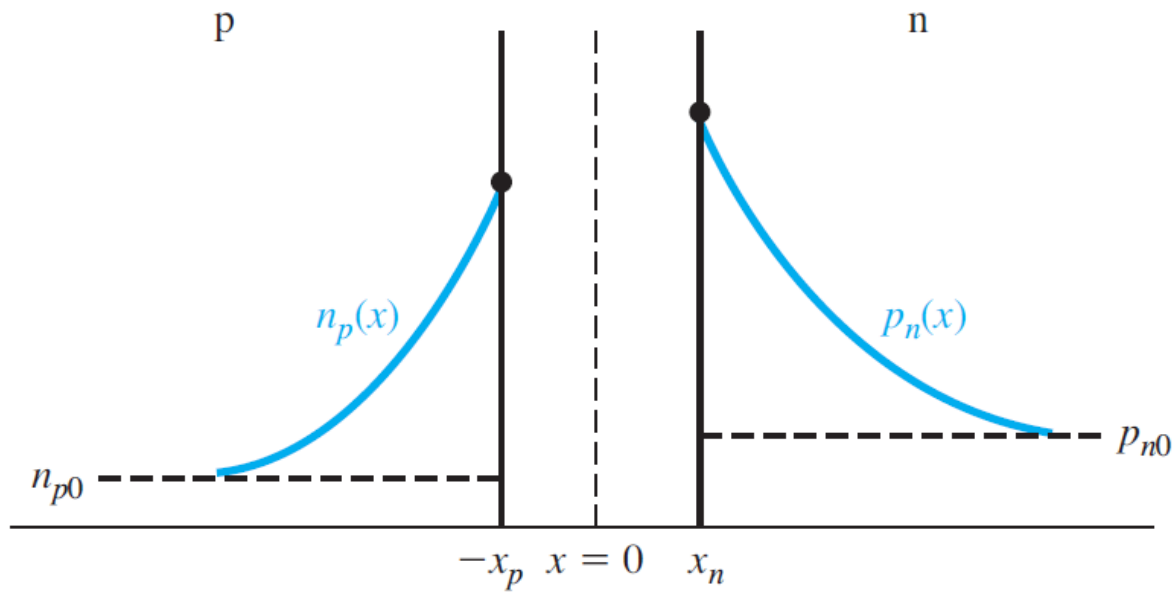
Αντίστοιχα

$$p_n = p_{n0} \cdot \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$$

Ορθή πόλωση επαφής pn (Forward applied bias)



Ορθή πόλωση επαφής pn (Forward applied bias)



Ορθή πόλωση επαφής pn (Forward applied bias)

Υπολογισμός ρεύματος διαχύσης οπών στην περιοχή n (minority carriers)

$$\frac{\partial p(x, t)}{\partial t} = -\frac{1}{q} \cdot \frac{\partial J_{p,x}(x, t)}{\partial x} + [G_p(x, t) - R_p(x, t)]$$

$$J_{p,x}^{dif} = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp(x)}{dx}$$

$$U = \frac{p(t) - p(0)}{\tau_p}$$

Στην μόνιμη κατάσταση

$$\frac{d^2(\delta p_n)}{dx^2} - \frac{\delta p_n}{L_p^2} = 0$$

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

$$L_p^2 = D_p \tau_{p0}$$

Ορθή πόλωση επαφής pn (Forward applied bias)

Από την επίλυση των εξισώσεων για τις **οπές** βρίσκω ότι

$$\delta p_n(x) = p_n(x) - p_{no} = p_{no} \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(\frac{x_n - x}{L_p}\right) \quad x > x_n$$

L_p : Μήκος διάχυσης των οπών στην περιοχή n

Ρεύμα διάχυσης οπών

$$J_{p,x}^{dif} = -q \cdot D_p \cdot \frac{dp(x)}{dx} \quad \longrightarrow \quad J_p(x_n) = \frac{eD_p p_{no}}{L_p} \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right]$$

Ορθή πόλωση επαφής pn (Forward applied bias)

Αντίστοιχα για τα **ηλεκτρόνια** βρίσκω ότι

$$\delta n_p(x) = n_p(x) - n_{p0} = n_{p0} \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \exp\left(\frac{x_p+x}{L_n}\right) \quad x < x_p$$

L_n : Μήκος διάχυσης των ηλεκτρονίων στην περιοχή p

Ρεύμα διάχυσης ηλεκτρονίων

$$J_{n,x}^{dif} = q \cdot D_n \cdot \frac{dn(x)}{dx} \quad \longrightarrow \quad J_n(-x_p) = \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right]$$

Ρεύμα διόδου pn

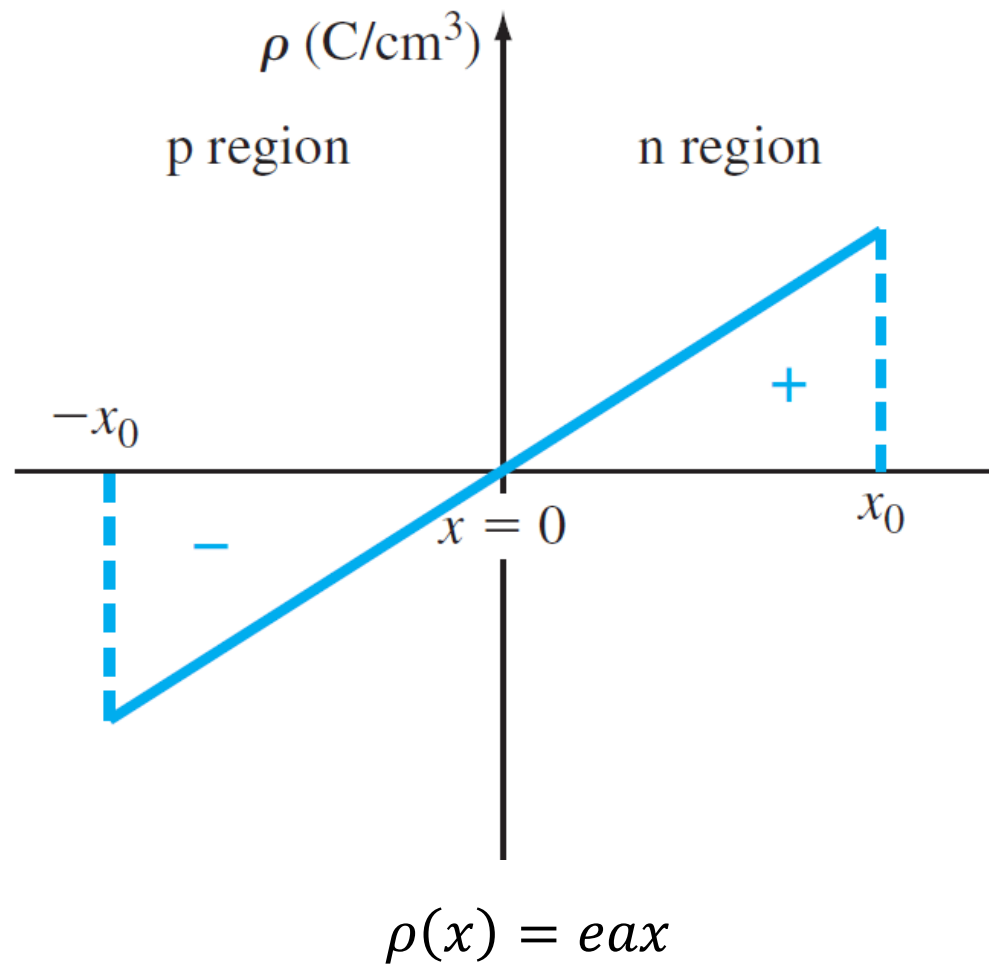
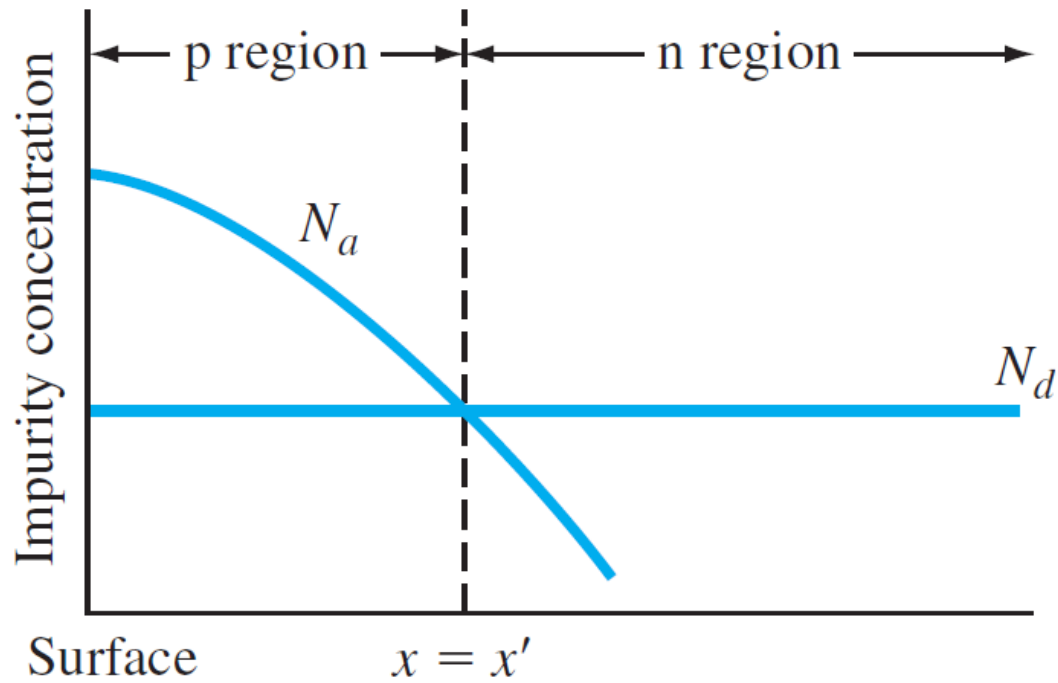
$$J = J_p(x_n) + J_n(-x_p) = \left[\frac{eD_p p_{no}}{L_p} + \frac{eD_n n_{po}}{L_n} \right] \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$J_S = \left[\frac{eD_p p_{no}}{L_p} + \frac{eD_n n_{po}}{L_n} \right]$$

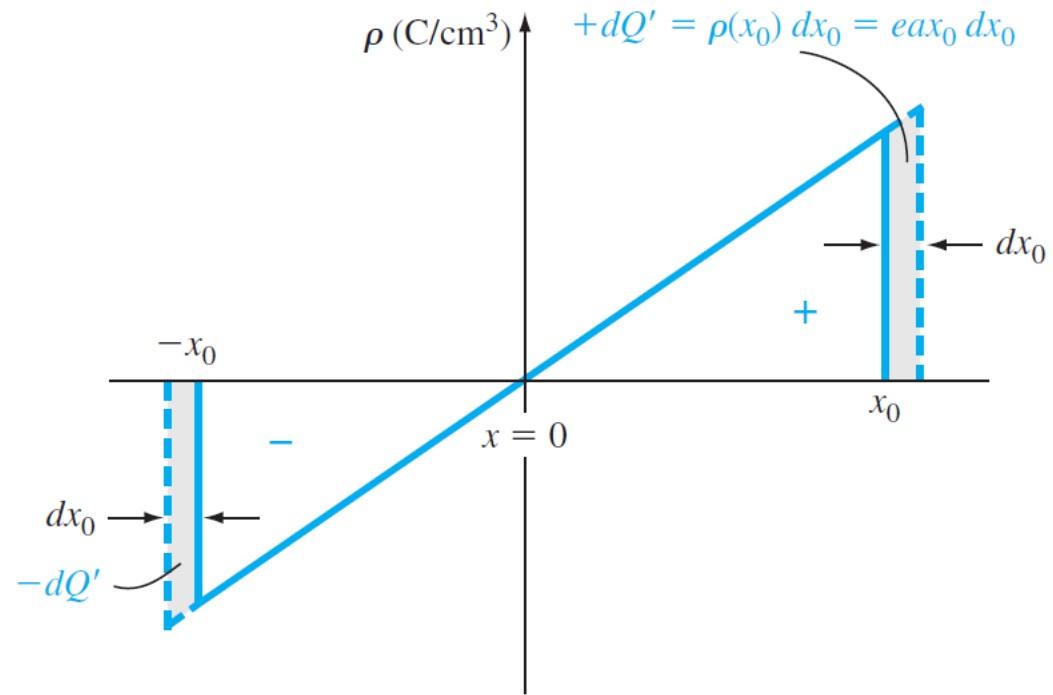
$$J = J_S \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right]$$

ΠΡΟΒΛΗΜΑ 1

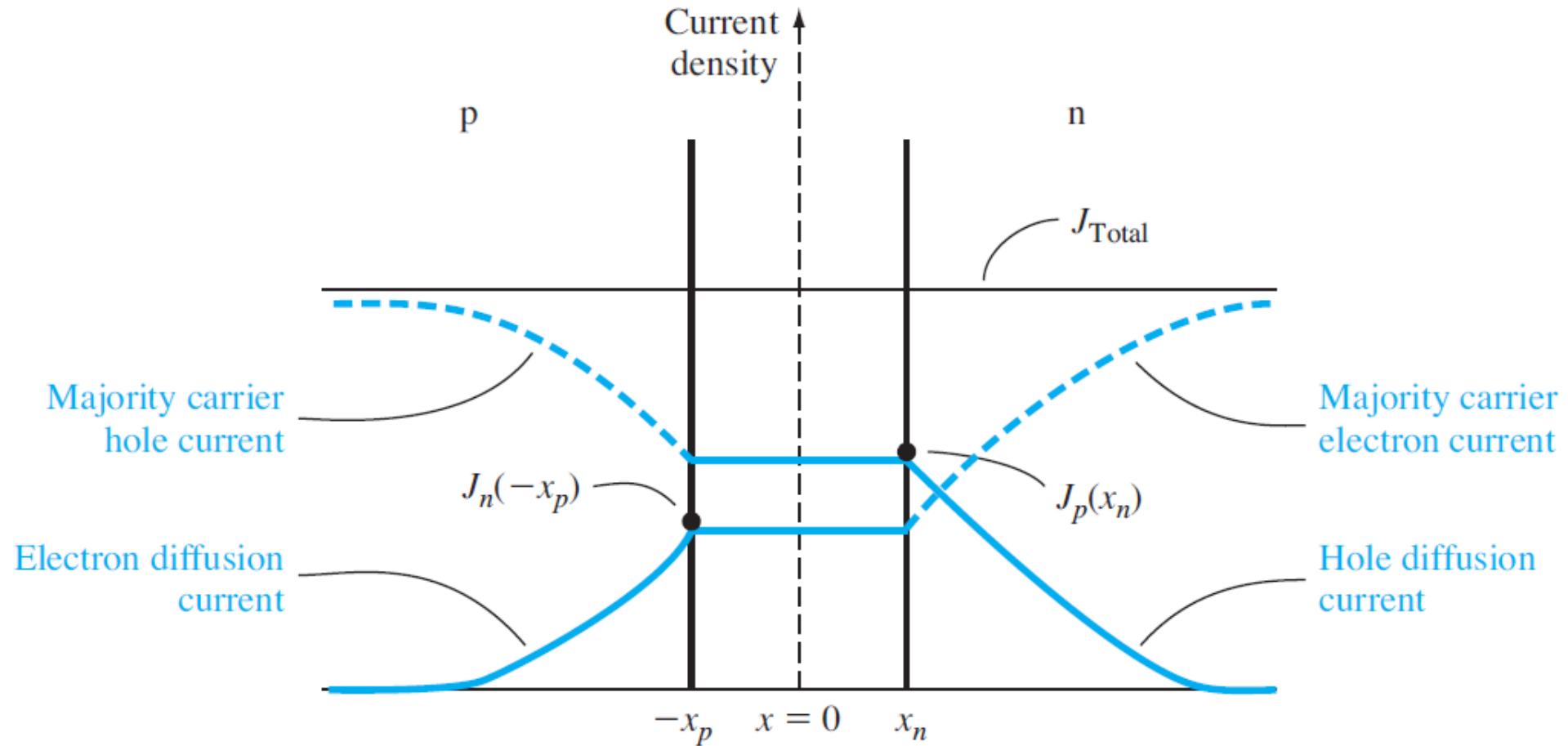
Linearly Graded Junctions



Linearly Graded Junctions

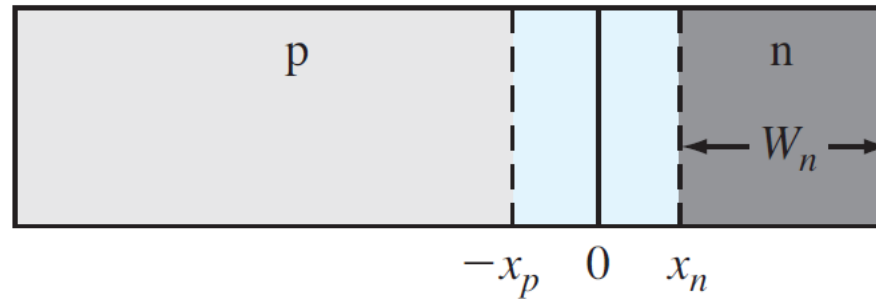


Ρεύμα διόδου pn



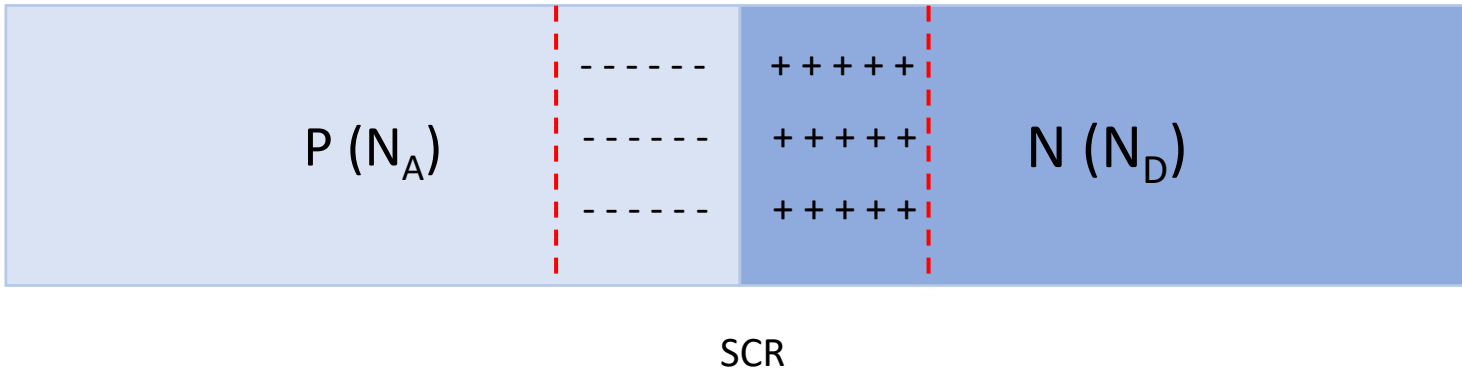
ΠΡΟΒΛΗΜΑ 2

Short diode approximation



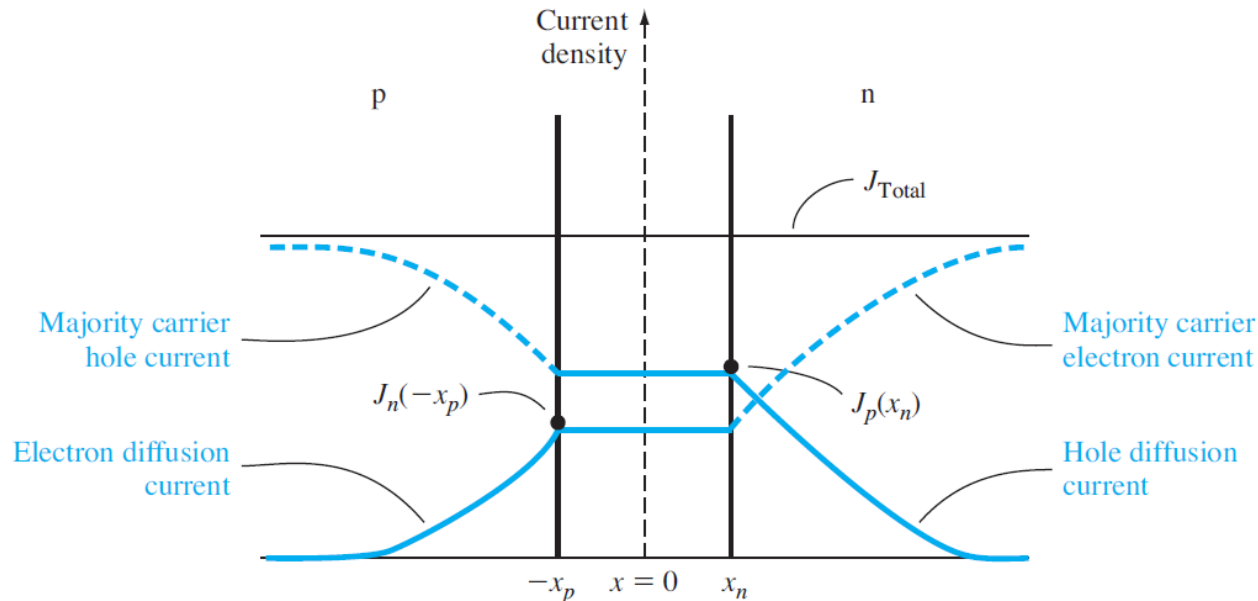
Να υπολογίσετε το ρεύμα της διόδου, όταν το μήκος της περιοχής n (W_n) είναι μικρότερο από το μήκος διάχυσης των οπών L_p .

Ρεύμα Γέννησης- Επανασύνδεσης Φορέων (Περιοχή SCR)



Μέχρι τώρα έχουμε αγνοήσει πλήρως τα φαινόμενα που συμβαίνουν στην SCR

Οι φορείς που εγχέονται στην περιοχή SCR τόσο από την περιοχή n όσο και από την περιοχή p επανασυνδέονται στην SCR



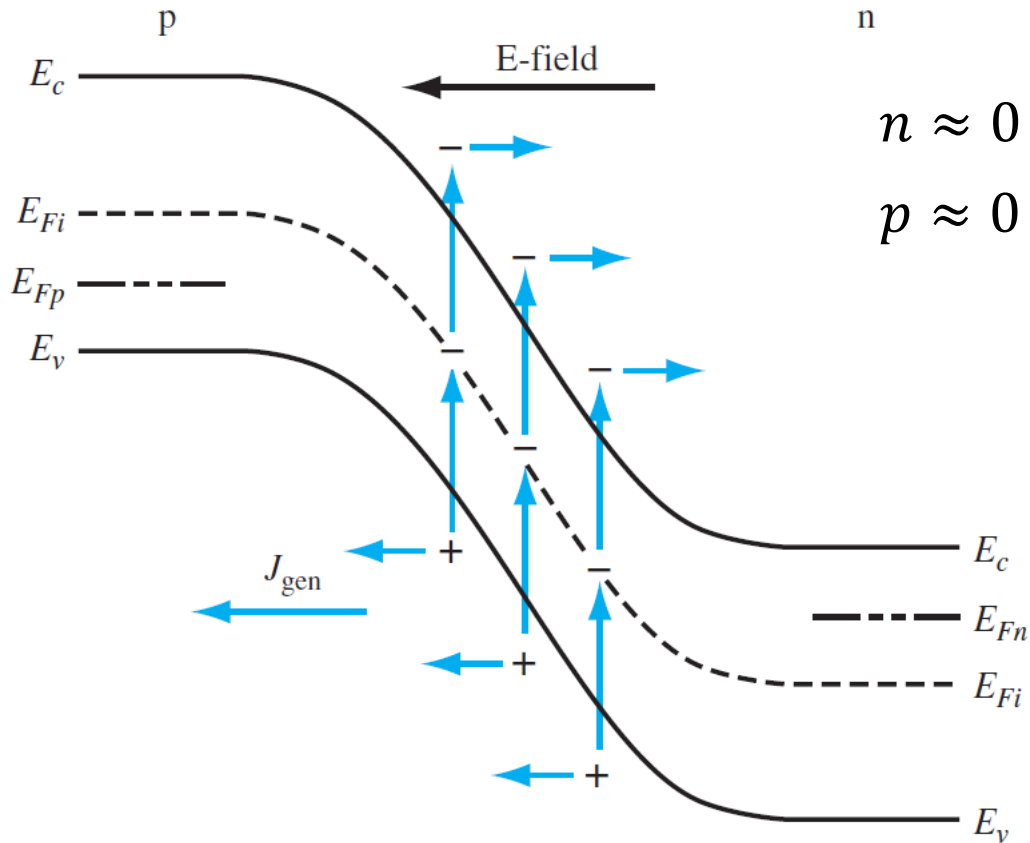
Shockley-Read-Hall (SRH)

$$U = \frac{n \cdot p - n_i^2}{\tau_{no} [p + p_T] + \tau_{po} [n + n_T]}$$

$$\frac{1}{\tau_{po}} = V_{th} \cdot \sigma_p \cdot N_T \quad \frac{1}{\tau_{no}} = V_{th} \cdot \sigma_n \cdot N_T$$

Ρεύμα Γέννησης Ανάστροφης Πόλωσης (Reverse-Biased Generation Current)

Στην ανάστροφη πόλωση έχουμε γέννηση φορέων στη SCR



$$G = - \frac{n_i^2}{\tau_{no}[p + p_T] + \tau_{po}[n + n_T]}$$

Θεωρώ ότι η στάθμη των παγίδων είναι στην E_{Fi}

$$p_T = n_T = n_i$$

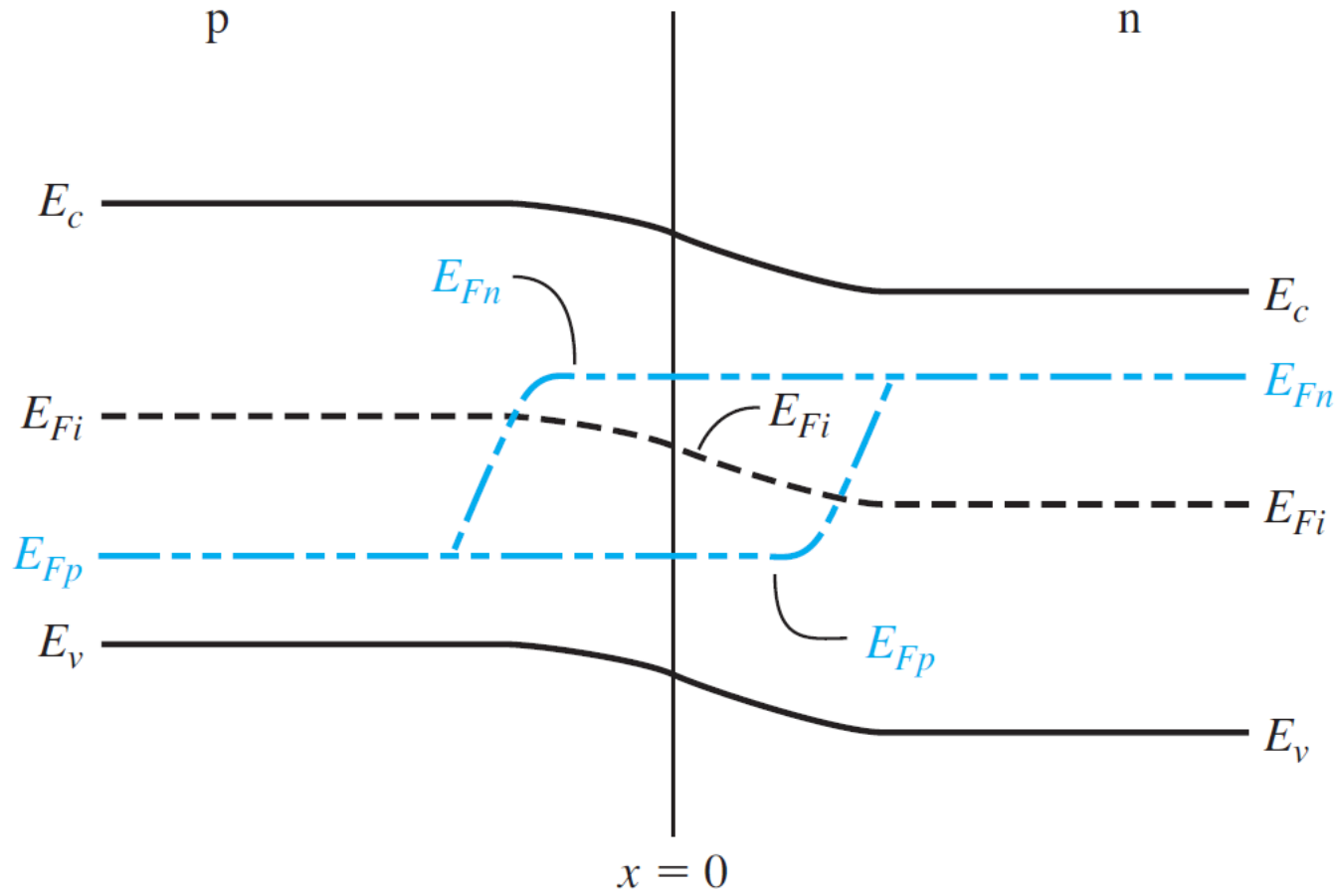
Ορίζω

$$\tau_o = \frac{\tau_{no} + \tau_{po}}{2}$$

$$J_{gen} = \int_0^W eGdx \quad \Rightarrow \quad J_{gen} = \frac{en_iW}{2\tau_o}$$

Πυκνότητα ρεύματος διόδου σε ανάστροφη πόλωση: $J_R = J_S + J_{gen}$

Ρεύμα Επανασύνδεσης Ορθής Πόλωσης (Forward-Bias Recombination Current)



Ρεύμα Επανασύνδεσης Ορθης Πόλωσης (Forward-Bias Recombination Current)

$$E_{F_n} - E_{F_p} = eV_a$$

$$(E_{F_n} - E_{F_i}) + (E_{F_i} - E_{F_p}) = eV_a$$

At the center of the space charge region

$$(E_{F_n} - E_{F_i}) = (E_{F_p} - E_{F_i}) = \frac{eV_a}{2}$$

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_{F_n} - E_{F_i}}{kT}\right)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_{F_i} - E_{F_p}}{kT}\right)$$

$$n = n_i \exp\left(\frac{eV_a}{2kT}\right)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{eV_a}{2kT}\right)$$

Ρεύμα Επανασύνδεσης Ορθης Πόλωσης (Forward-Bias Recombination Current)

$$R = \frac{n \cdot p - n_i^2}{\tau_{no}[p + p_T] + \tau_{po}[n + n_T]}$$

Θεωρώντας ότι

$$p_T = n_T$$

$$\tau_{no} = \tau_{po} = \tau_o$$

$$R_{max} = \frac{n_i \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right]}{2\tau_o \left[\exp\left(\frac{eV_a}{2kT}\right) + 1 \right]}$$

$$V_a \gg \frac{kT}{e}$$

$$R_{max} = \frac{n_i}{2\tau_o} \exp\left(\frac{eV_a}{2kT}\right)$$

Ρεύμα Επανασύνδεσης Ορθής Πόλωσης (Forward-Bias Recombination Current)

Ρεύμα επανασύνδεσης

$$J_{rec} = \int_0^W eR dx$$

$$R_{max} = \frac{n_i}{2\tau_o} \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$$

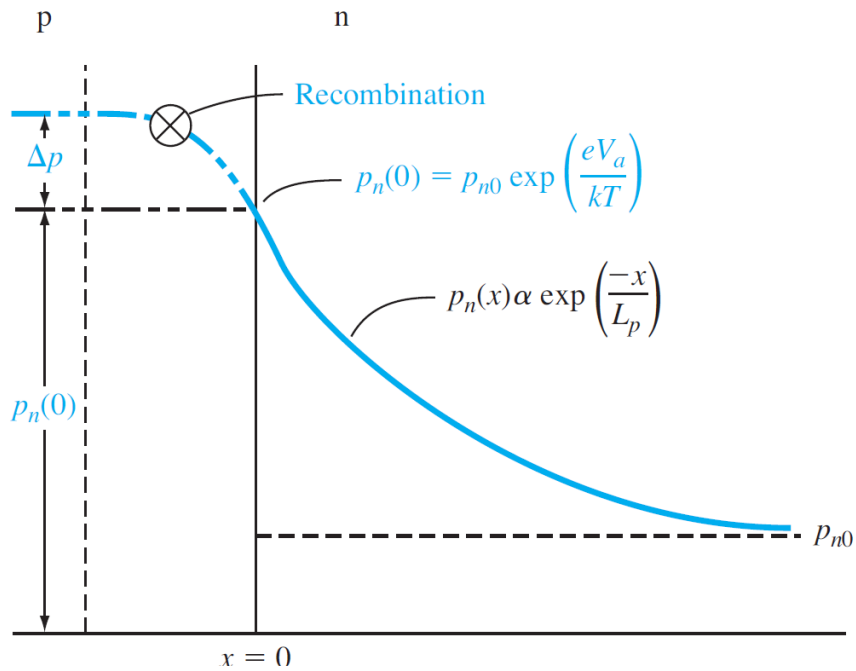
$$J_{rec} = ex' \frac{n_i}{2\tau_o} \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$$

x' is a length over which the maximum recombination rate is effective

$$J_{rec} = \frac{eWn_i}{2\tau_o} \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) = J_{r0} \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$$

Ρεύμα Επανασύνδεσης Ορθής Πόλωσης (Forward-Bias Recombination Current)

Total Forward-Bias Current



$$J = J_D + J_{rec}$$

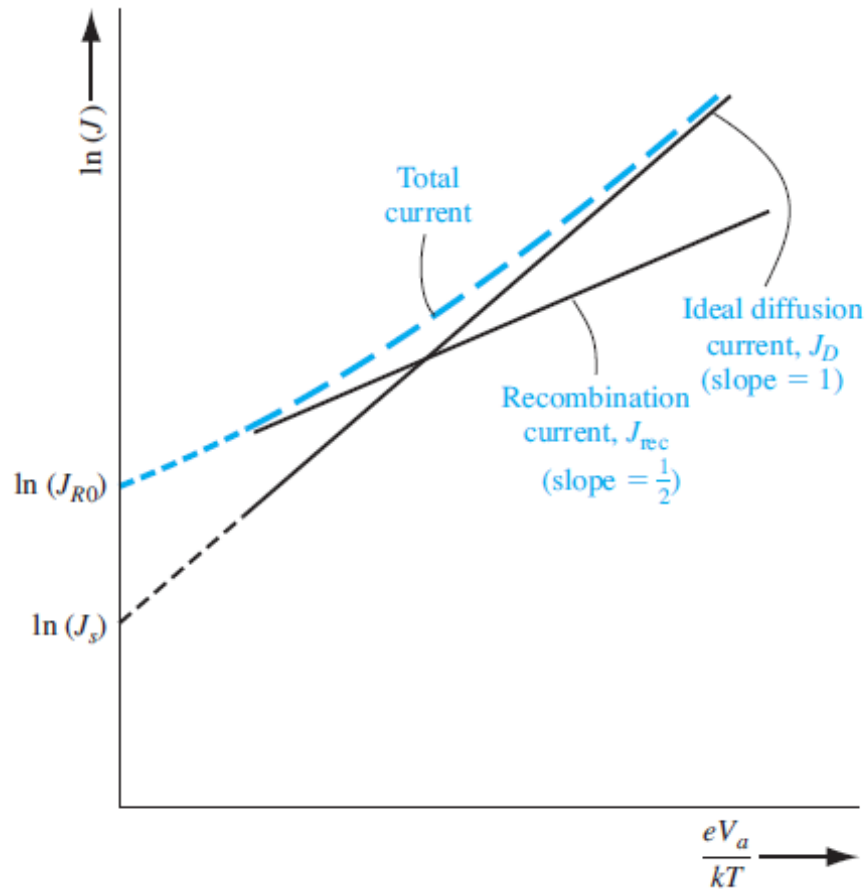
$$J_{rec} = J_{r0} \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$$

$$J_D = J_S \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \approx J_S \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$$

$$I = I_S \left[\exp\left(\frac{eV_a}{nkT}\right) - 1 \right]$$

n:ideality factor

Ρεύμα σε συνθήκες υψηλής έγχυσης φορέων (High-Level Injection)



Τι ισχύει σε συνθήκες υψηλής έγχυσης φορέων (High-Level Injection)

Ρεύμα σε συνθήκες υψηλής έγχυσης φορέων (High-Level Injection)

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_{F_n} - E_{F_i}}{kT}\right)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_{F_i} - E_{F_p}}{kT}\right)$$

$$E_{F_n} - E_{F_p} = eV_a$$

$$np = n_i^2 \exp\left(\frac{E_{F_n} - E_{F_p}}{kT}\right) = n_i^2 \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$$

$$V_T = \frac{kT}{e}$$

$$np = n_i^2 \exp\left(\frac{V_a}{V_T}\right)$$

Ρεύμα σε συνθήκες υψηλής έγχυσης φορέων (High-Level Injection)

$$\begin{array}{l} n = n_o + \delta n \\ p = p_o + \delta p \end{array} \left. \vphantom{\begin{array}{l} n = n_o + \delta n \\ p = p_o + \delta p \end{array}} \right\} (n_o + \delta n)(p_o + \delta p) = n_i^2 \exp\left(\frac{V_a}{V_T}\right)$$

High-Level Injection
 $\delta n \gg n_o \quad \delta p \gg p_o$

$$\left. \vphantom{\begin{array}{l} n = n_o + \delta n \\ p = p_o + \delta p \end{array}} \right\} \delta n \delta p = n_i^2 \exp\left(\frac{V_a}{V_T}\right)$$

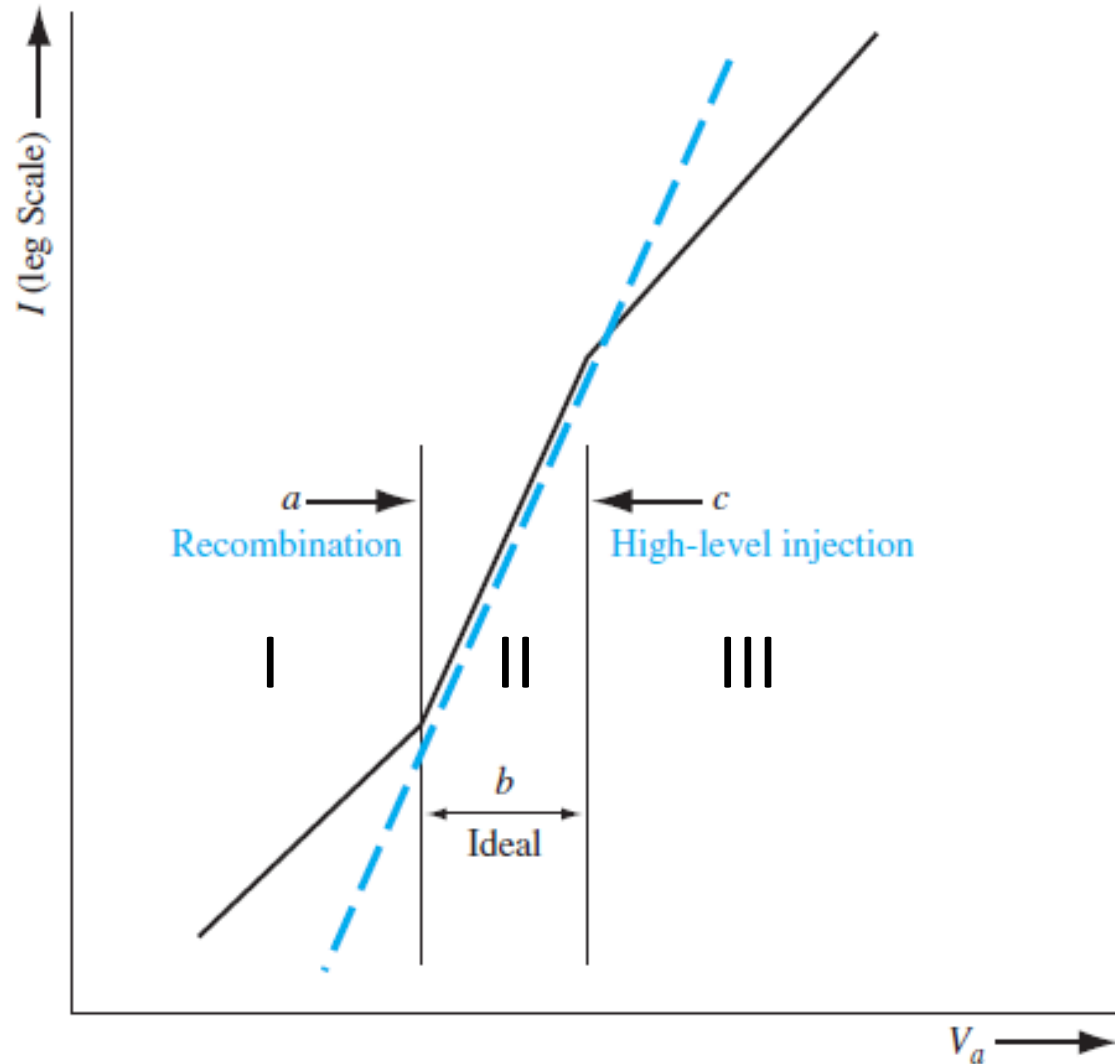
Ισχύει ότι

$$\delta n = \delta p \quad \delta n = \delta p = n_i^2 \exp\left(\frac{V_a}{2V_T}\right)$$

Το ρεύμα της διόδου είναι ανάλογο της συγκέντρωσης της περισσείας των φορέων

$$I \propto \exp\left(\frac{V_a}{2V_T}\right)$$

Ρεύμα διόδου pn



$$I = I_s \left[\exp\left(\frac{eV_a}{nkT}\right) - 1 \right]$$

Περιοχή I

$$I_{rec} = J_{r0} \exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right)$$

Περιοχή II

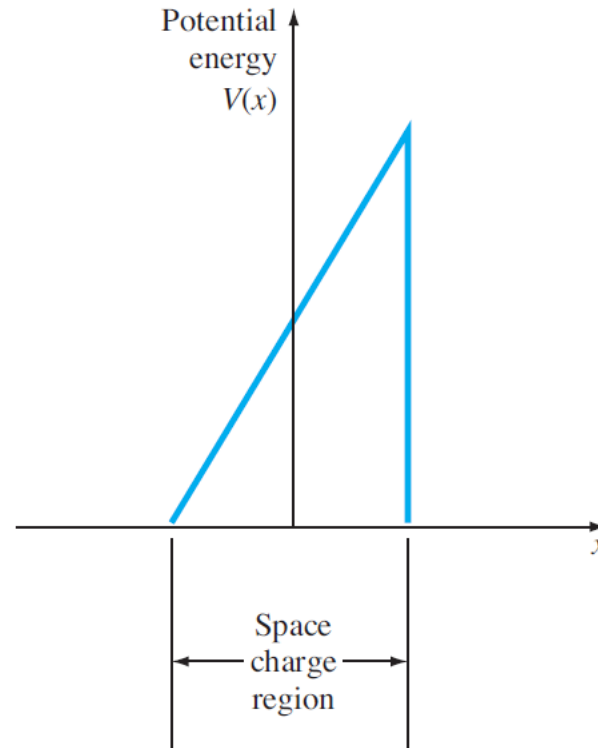
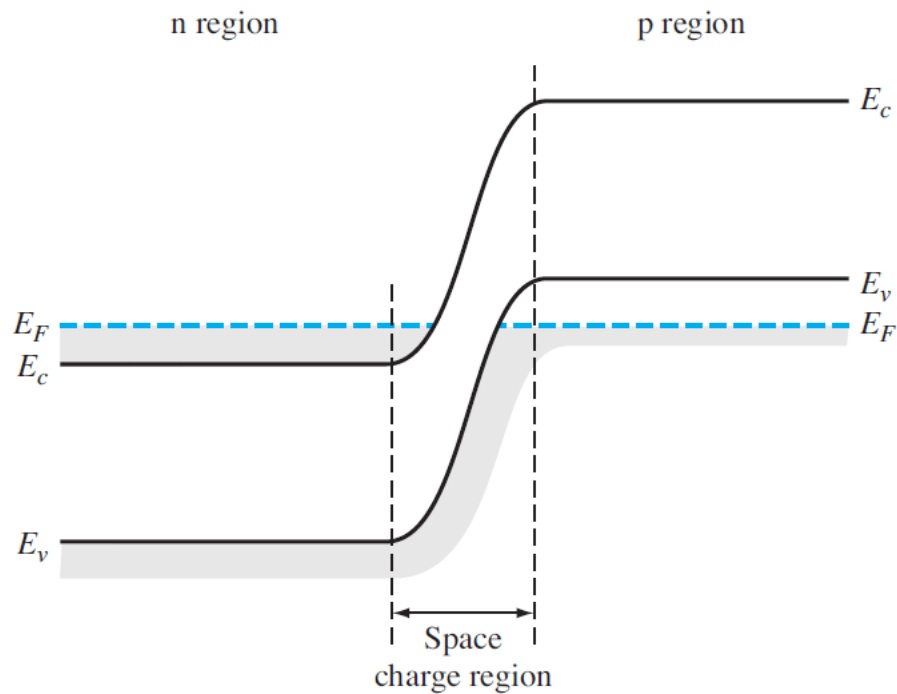
$$I_D = J_S \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right]$$

Περιοχή III

$$I \propto \exp\left(\frac{V_a}{2V_T}\right)$$

THE TUNNEL DIODE (Esaki diode)

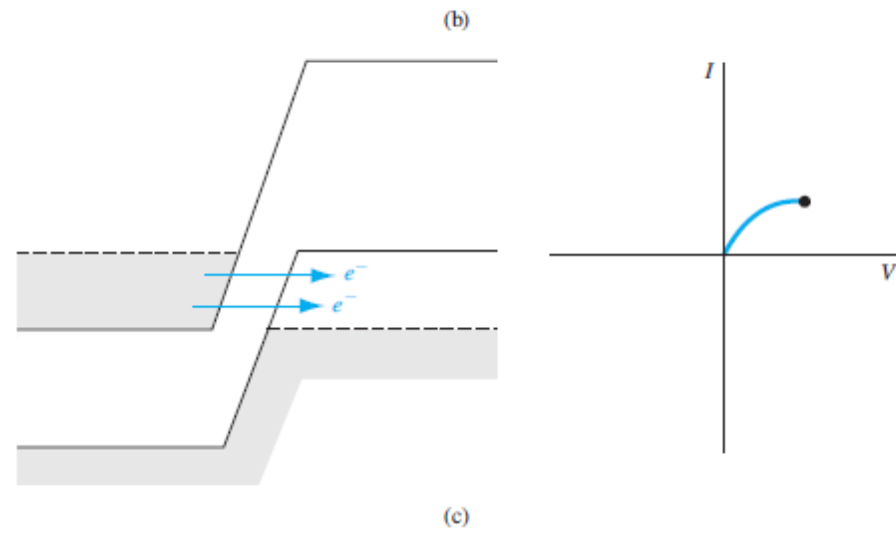
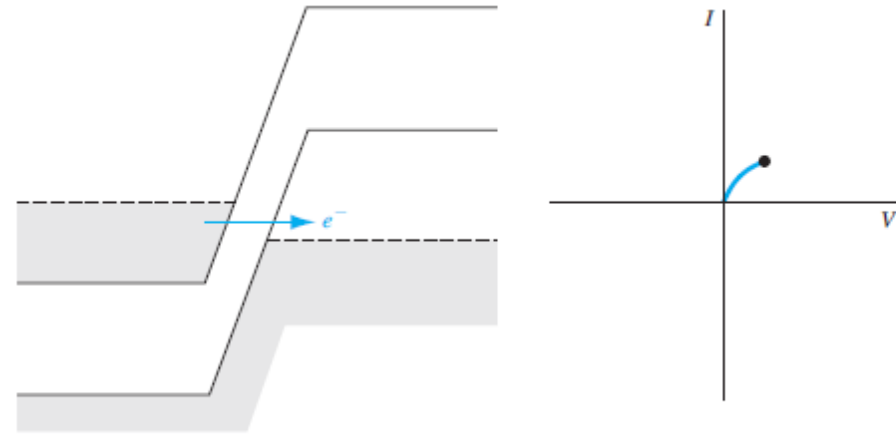
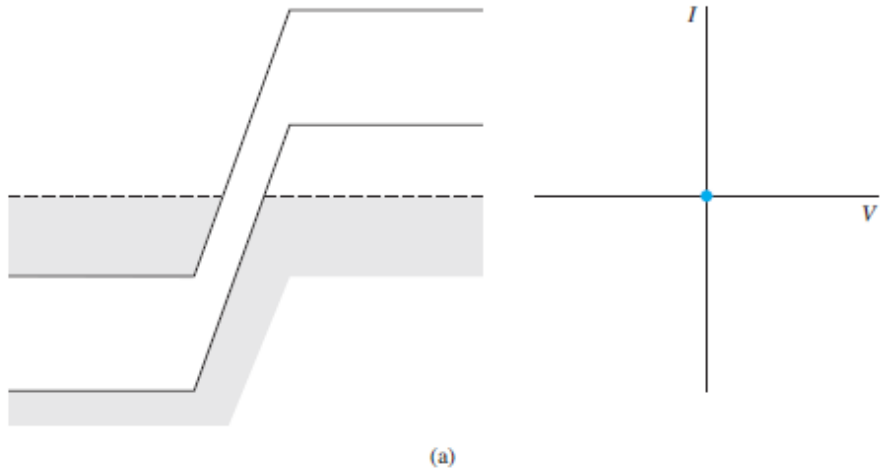
Tunnel diode: είναι μίας δίοδος pn στην οποία και οι δύο περιοχές n,p είναι υψηλά νοθευμένες (degenerately doped).



THE TUNNEL DIODE

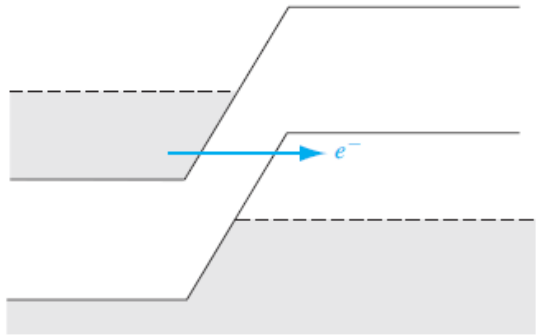
Ορθή Πόλωση

$V=0$

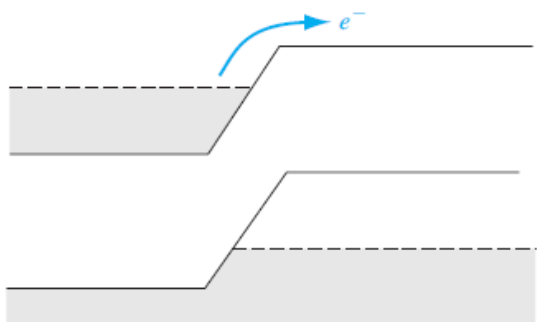
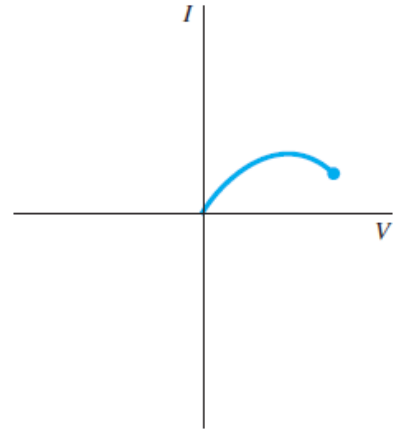


THE TUNNEL DIODE

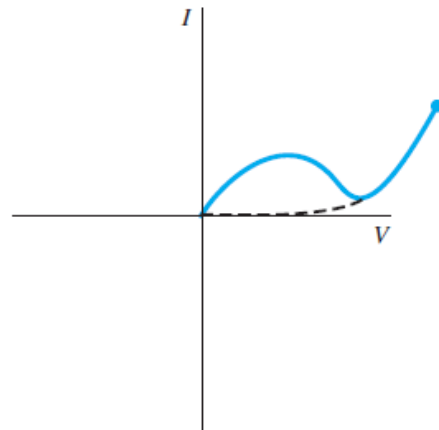
Ορθή Πόλωση



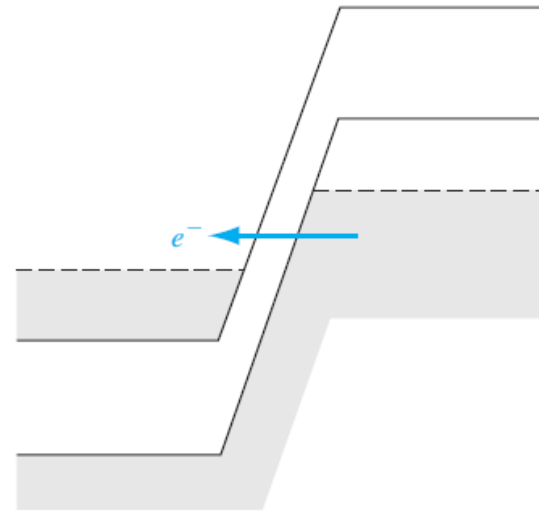
(d)



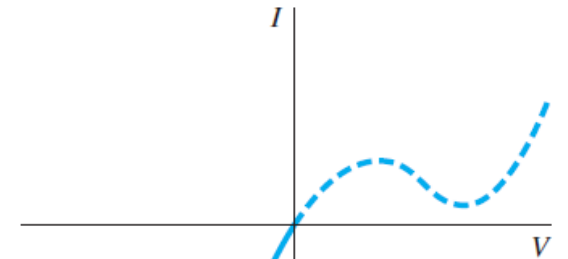
(e)



Ανάστροφη Πόλωση



(a)



(b)