

Θερμική κίνηση ηλεκτρονίων και οπών:

Η κινητική ενέργεια ενός ηλεκτρονίου στη ζώνη αγωγιμότητας είναι $E - E_c$ και μιας οπής στη ζώνη σθένους είναι $E_v - E$

Μέση κινητική ενέργεια ηλεκτρονίων (ή οπών) = $\frac{\text{αθροισμα κινητικών ενεργειών}}{\text{αριθμός φορέων (ηλ. ή οπών)}}$

$$A_{\eta\lambda} \quad \frac{\int_{E_c}^{\infty} f(E) D_c(E) (E - E_c) dE}{\int_{E_c}^{\infty} f(E) D_c(E) dE} \quad \leftarrow \begin{array}{l} \text{για τα ηλεκτρόνια} \\ \text{για τις οπές} \end{array} \rightarrow \frac{\int_{E_{\min}}^{E_v} (1 - f(E)) D_v(E) (E_v - E) dE}{\int_{E_{\min}}^{E_v} (1 - f(E)) D_v(E) dE}$$

Το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης είναι

$$\frac{3}{2} kT$$

Παίρνοντας, $\frac{1}{2} m_{\eta} v_{th}^2 = \frac{3}{2} kT$ βρίσκουμε:

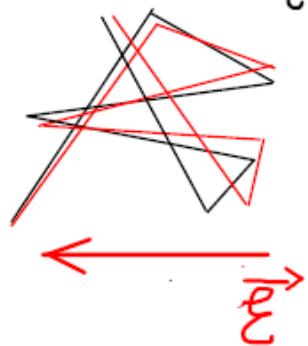
$$v_{th,\eta} = \sqrt{\frac{3kT}{m_{\eta}}} \quad , \quad v_{th,p} = \sqrt{\frac{3kT}{m_p}} \quad (m_{\eta} \text{ και } m_p \text{ οι ενεργείες μάζες ηλεκτρ. & οπών})$$

Για το Si στους $300^\circ K$, όπου $m_{\eta} = 0.26 m_0$ και $m_p = 0.39 m_0$ όπου $m_0 = 9.1 \times 10^{-31} kg$

$$v_{th,\eta} = \sqrt{\frac{3 \times 1.38 \cdot 10^{-23} J/K \times 300 K}{0.26 \times 9.1 \cdot 10^{-31} kg}} = 2.29 \times 10^5 m/s \quad \text{ή} \quad 2.29 \times 10^7 \frac{cm}{s} \quad \text{και} \quad v_{th,p} = 1.87 \times 10^5 m/s$$

δηλαδή 100 φορές λιγότερο από την ταχύτητα του φωτός και 100 φορές περισσότερο από την ταχύτητα του ήχου.

Τα ηλεκτρόνια και οι οπές αλλάζουν κατεύθυνση γιατί συγκρούονται διαρκώς (α) με τα παλλόμενα άτομα του κρυστάλλου και (β) με τα ιόντα των νοθεύσεων (θετικά και αρνητικά). Όταν υπάρχει εξωτερικά εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο, τότε η κίνησή τους επηρεάζεται και από αυτό



Εικόνα της κίνησης ενός ηλεκτρονίου χωρίς (μαύρο) και με την παρουσία (κόκκινο) ηλεκτρικού πεδίου.

Η επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου είναι:

$$F = q_e \cdot E. \text{ Η δύναμη αυτή μεταβάλλει}$$

Την ταχύτητα (και άρα την ορμή)

για το χρονικό διάστημα Δt που μπορούμε να το πάρουμε ως τον μέσο χρόνο

ανάμεσα σε δύο συγκρούσεις λόγω θερμικής κίνησης.

$$\text{Ανάλυση: } m_n \frac{\Delta v}{\Delta t} = q_e E \Rightarrow m_n \Delta v = q_e \cdot E \cdot \Delta t = q_e E \cdot \tau \quad (\tau \text{ ο μέσος χρόνος}$$

μεταξύ δύο συγκρούσεων) δηλ. $\Delta v = \frac{q_e E \tau_n}{m_n}$. Η μέση ταχύτητα είναι

$$v = \frac{0 + \Delta v}{2} \text{ αφού } 2v = \Delta v \text{ και}$$

$$\text{τελικά } v = \frac{q_e E \tau_n}{2 m_n} \text{ αυτή σχετίζεται ταχύτητα}$$

ορίσθηκε των ηλεκτρονίων.

$$v_{\text{drift}, n}$$

$$\text{Αντίστοιχα για τις οπές } v_{\text{drift}, p} = \frac{q_e E \tau_p}{2 m_p}$$

$$\text{Δηλαδή: } v_{\text{drift}, n} = \mu_n E \text{ όπου}$$

$$\mu_n = \frac{q_e \tau_n}{2 m_n}$$

"ευσυννησία ηλεκτρονίων"

$$\mu = \frac{v}{E}$$

$$\frac{\text{cm/s}}{\text{V/cm}} = \frac{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}{\text{V}}$$

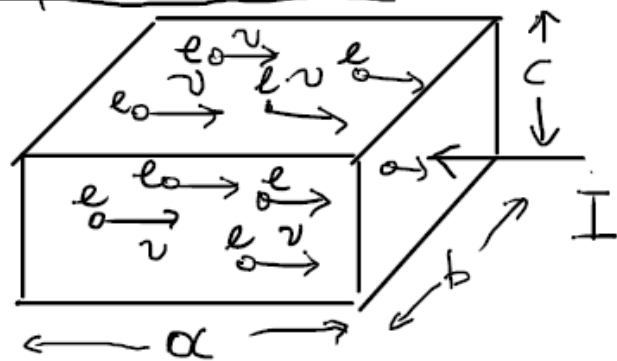
$$v_{\text{drift}, p} = \mu_p E$$

$$\mu_p = \frac{q_e \tau_p}{2 m_p}$$

"ευσυννησία οπών"

ημιαγωγός	Si	Ge	GaAs
$\mu_n (\frac{cm^2}{V \cdot s})$	1400	3900	8500
$\mu_p (\frac{cm^2}{V \cdot s})$	470	1900	400

Ρεύμα Οχίσθης



$$t = \frac{a}{v_{drift}}$$

Συνοφένως το ρεύμα $I = \frac{Q}{t} = \frac{-q_e \cdot n \cdot V}{\frac{a}{v_{drift}}} = \frac{-q_e \cdot n \cdot a \cdot b \cdot c}{\frac{a}{v_{drift}}} \Rightarrow$

$$I = -q_e \cdot n \cdot v_{drift} \cdot b \cdot c \quad \text{και}$$

πυκνότητα ρεύματος οχίσθης: $J_{drift, n} = \frac{I}{bc} = \frac{I}{bc} = -q_e \cdot n \cdot v_{drift, n}$
(ηλεκτρονίων)

Όταν μεγαλώνει το E αυξάνει η ταχύτητα οχίσθης. Όταν φτάσει $v_{drift} \approx v_{th} (\sim 10^7 \frac{cm}{s})$ τότε ενεργοποιείται ένας μηχανισμός που δεν επιτρέπει περαιτέρω αύξηση της v_{drift} .

Έστω ότι η πυκνότητα φορέων (ή οπών) μέσα σε έναν όγκο V είναι n (ή p)

Το φορτίο μέσα στον V είναι $Q = -q_e \cdot n \cdot V$

Όταν το φορτίο κινείται με ταχύτητα v_{drift} τότε όλο το φορτίο θα περάσει από την επιφάνεια με εμβαδόν $b \cdot c$ μέσα σε χρόνο t

$$\vec{J}_{n,drift} = -q_e \cdot n \cdot \vec{v}_{drift,n} \quad \vec{v}_{drift,n} = -\mu_n \vec{E} \quad \text{αρα} \quad \vec{J}_{drift,n} = -q_e \cdot n \cdot (-1) \mu_n \cdot \vec{E}$$

ομοίως:

$$\vec{J}_{drift,p} = q_e \cdot p \cdot \vec{v}_{drift,p} \quad \vec{v}_{drift,p} = \mu_p \cdot \vec{E} \quad \text{αρα} \quad \vec{J}_{drift,p} = q_e \cdot p \cdot \mu_p \cdot \vec{E}$$

και $\vec{J}_{drift} = q_e (\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p) \cdot \vec{E} = \sigma \cdot \vec{E}$ όπου σ ονομάζεται σ

αγωγιμότητα $\sigma = q_e (\mu_n n + \mu_p p)$,

ειδική αντίσταση $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q_e (\mu_n n + \mu_p p)}$

Μονάδες:

$$[\sigma] = [q] \cdot [\mu] \cdot \left[\begin{matrix} n \\ p \end{matrix} \right]$$

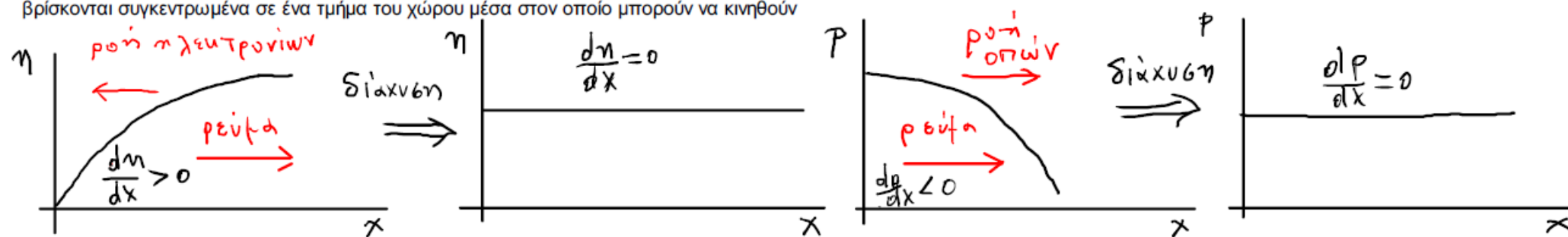
$$[\sigma] = C \cdot \frac{cm^2}{V \cdot s} \cdot \frac{1}{cm^3} = \frac{C}{s} \cdot \frac{1}{V \cdot cm} = \frac{A}{V \cdot cm} = \Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$$

$$[\rho] = \left[\frac{1}{\sigma} \right] = \frac{V \cdot cm}{A} = \Omega \cdot cm$$

Παράδειγμα: Η ειδική αντίσταση του Si, όταν $N_D = 10^{17}/cm^3$ και $\mu_n = 750 \frac{cm^2}{V \cdot s}$ είναι

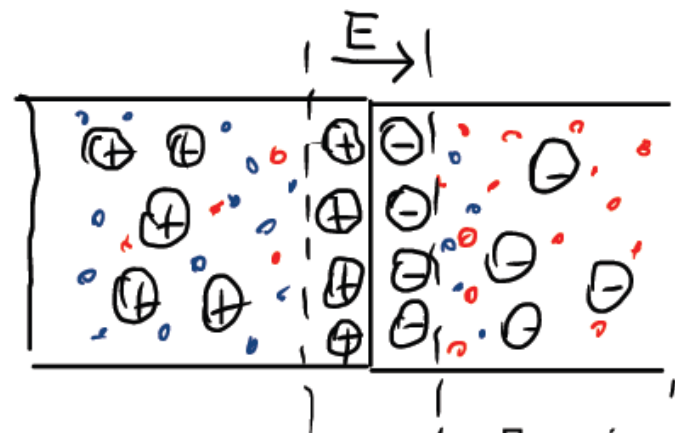
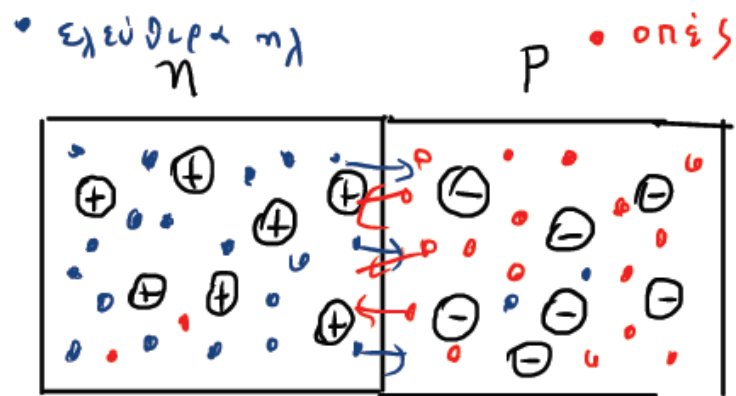
$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad \text{όπου} \quad \sigma = \underbrace{1.6 \cdot 10^{-19}}_{q_e} \cdot \underbrace{10^{17}}_n \cdot \underbrace{750}_{\mu_n} = 1.6 \times 7.5 \Omega^{-1} cm^{-1} = 12 \Omega^{-1} cm^{-1} \quad \text{άρα} \quad \rho = 0.0833 \Omega \cdot cm$$

Ρεύμα διάχυσης · Η διάχυση είναι το αποτέλεσμα της θερμικής κίνησης των ηλεκτρονίων και των οπών ή οποιουδήποτε πληθυσμού σωματιδίων που κινούνται τυχαία και αρχικά βρίσκονται συγκεντρωμένα σε ένα τμήμα του χώρου μέσα στον οποίο μπορούν να κινηθούν

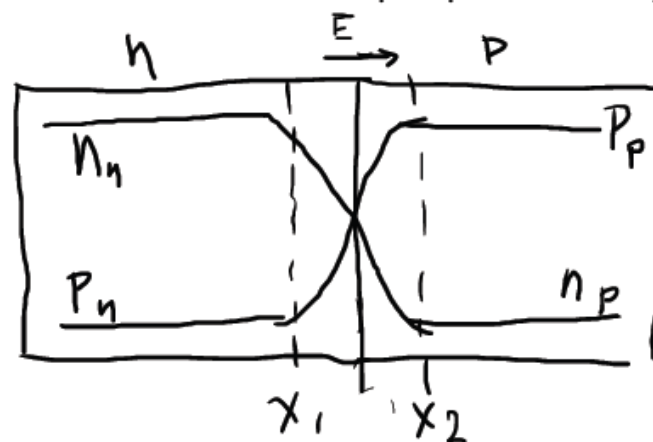


Για τα ηλεκτρόνια: $J_{n,diff}$ (διάχυση: diffusion) $J_{n,diff} = n(-q_e)(-v) = q_e D_n \frac{dn}{dx}$ ($\frac{dn}{dx} > 0$)

Για τις οπές $J_{p,diff} = -q_e D_p \frac{dp}{dx}$ (γιατί $\frac{dp}{dx} < 0$)



Περιοχή απογύμνωσης από ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές



Επειδή οι οπές έχουν πολύ μικρή συγκέντρωση στην περιοχή n διαχέονται από την περιοχή p στην περιοχή n.
Το ίδιο και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια διαχέονται από την περιοχή n στην περιοχή p

Στην διεπαφή ηλεκτρόνια και οπές ακυρώνονται και φτιάχνουν μια περιοχή "απογύμνωσης"

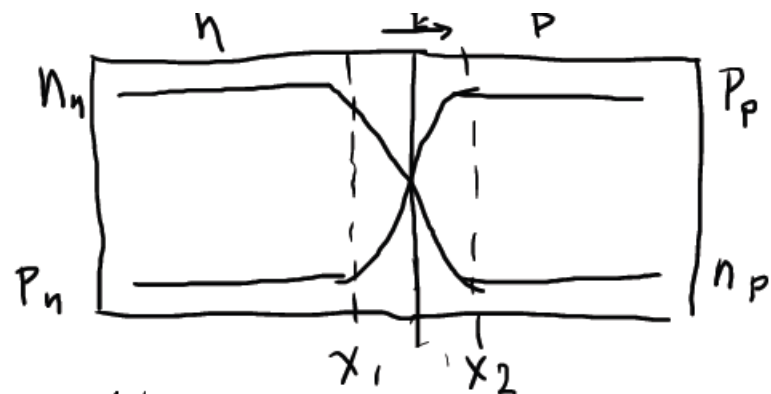
Στην περιοχή απογύμνωσης τα ακίνητα θετικά φορτία (των ατόμων που έχουν χάσει ένα ηλεκτρόνιο σθένους) και τα ακίνητα αρνητικά φορτία (των ατόμων που έχουν κερδίσει ένα ηλεκτρόνιο σθένους) χτίζουν ένα ηλεκτρικό πεδίο που σταματάει την διάχυση

Στην περιοχή απογύμνωσης το ρεύμα είναι μηδέν γιατί το ρεύμα λόγω διάχυσης ακυρώνεται από ένα ίσο αλλά αντίθετης φοράς ρεύμα λόγω της ολίσθησης στο ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται

$$\Leftrightarrow - \int_{V(x_1)}^{V(x_2)} dV = \frac{D_p}{\mu_p} \int_{P(x_1)}^{P(x_2)} \frac{dP}{P} \Leftrightarrow V(x_1) - V(x_2) = \frac{D_p}{\mu_p} \ln\left(\frac{P(x_2)}{P(x_1)}\right) = \frac{D_p}{\mu_p} \ln\left(\frac{P_p}{P_n}\right)$$

$$q_p \mu_p E = q_e D_p \frac{dP}{dx} \quad \text{Επειδή} \quad E = - \frac{dV}{dx}$$

$$\text{έχουμε} \quad -p \mu_p \frac{dV}{dx} = D_p \frac{dP}{dx} \Leftrightarrow -dV = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{dP}{P} \Leftrightarrow$$



Επειδή
 $n_n \cdot p_n = n_i^2$ το $p_n = \frac{n_i^2}{n_n}$ επομένως

$$V(x_1) - V(x_2) = \frac{D_p}{\mu_p} \ln \left(\frac{p_p n_n}{n_i^2} \right)$$

Η σταθερά διάχυσης D_p αποδεικνύεται ότι είναι: $D_p = \frac{\mu_p k T}{q_e}$

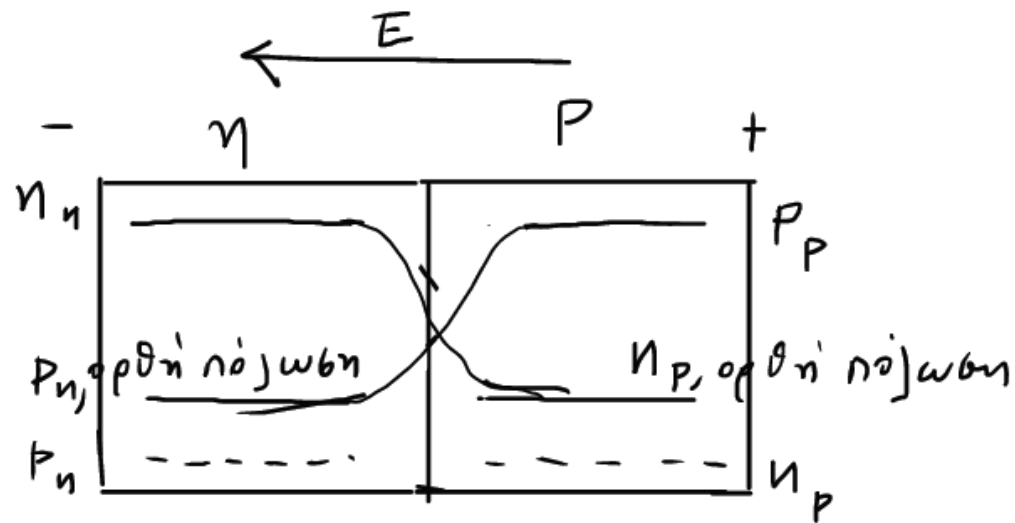
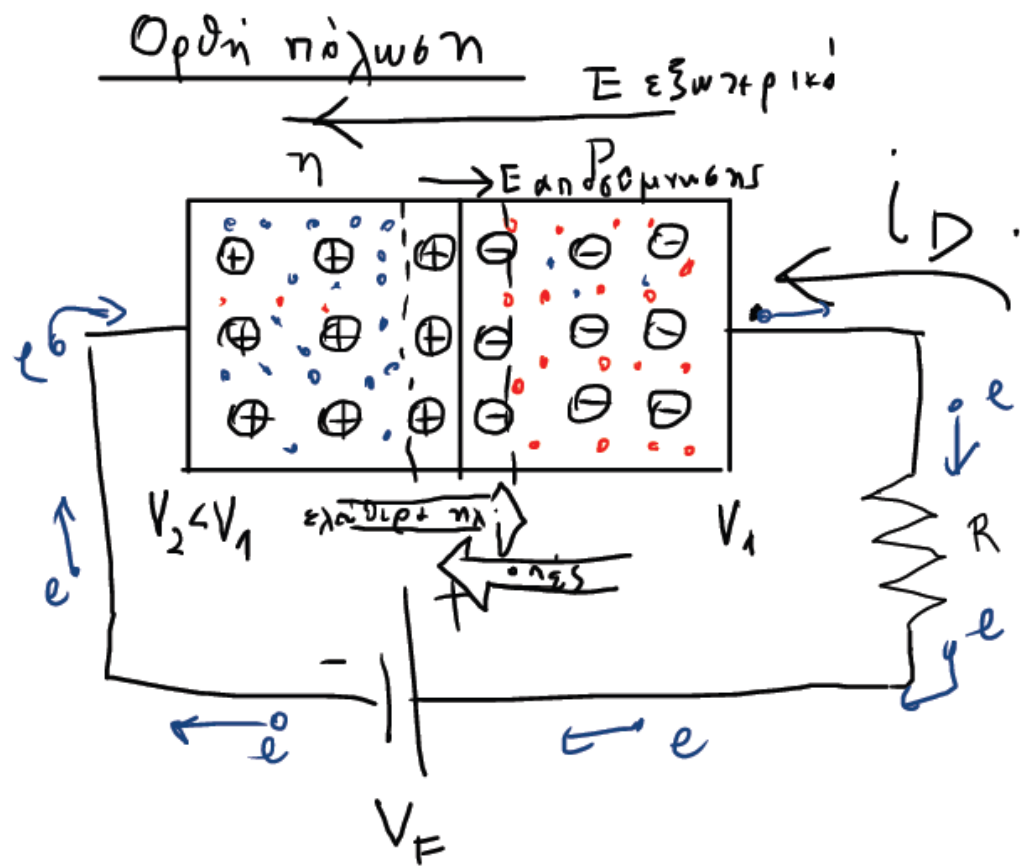
Άρα $V(x_1) - V(x_2) = \frac{k T}{q_e} \ln \left(\frac{p_p n_n}{n_i^2} \right)$

Για $p_p = n_n = 10^{15} / \text{cm}^3$ έχουμε

$$V(x_1) - V(x_2) \approx 26 \text{ mV} \cdot \ln \left(\frac{10^{15} \cdot 10^{15}}{10^{20}} \right) \approx 600 \text{ mV}$$

Για $p_p = n_n = 10^{16} / \text{cm}^3$ έχουμε

$$V(x_1) - V(x_2) \approx 26 \text{ mV} \cdot \ln \left(\frac{10^{16} \cdot 10^{16}}{10^{20}} \right) \approx 718 \text{ mV}$$



Η ορθή πόλωση εφαρμόζει ένα ηλεκτρικό πεδίο αντίθετο από αυτό του ηλεκτρικού πεδίου της περιοχής απογύμνωσης που το ακυρώνει και επιτρέπει στα ελεύθερα ηλεκτρόνια και στις σπές να κινούνται κατά μήκος της διόδου και να διατηρούν ηλεκτρικό ρεύμα

Το ρεύμα ορθής πόλωσης είναι:

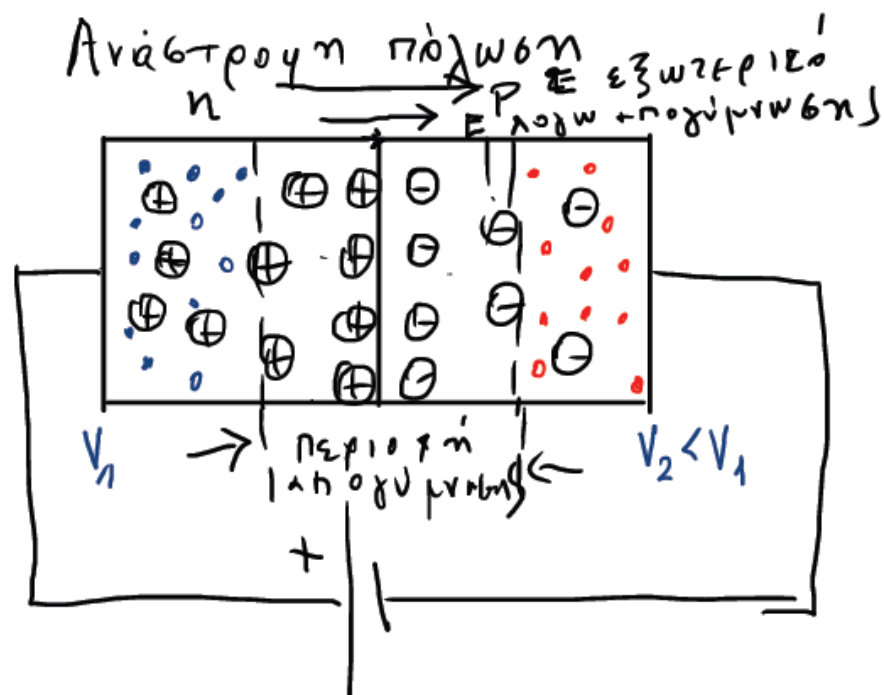
$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V_D}{\eta kT/q_e}} - 1 \right)$$

$$I_S = A \cdot q_e \cdot \eta_i^2 \cdot \left(\frac{D_n}{p_p \cdot L_p} - \frac{D_p}{n_n \cdot L_n} \right)$$

A : εμβαδόν $q_e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ $\eta_i^2 = 10^{20} / \text{cm}^3$ (στους 300° K)

D_n, D_p οι σταθερές διάχυσης, p_p, n_n οι συγκεντρώσεις οπών & ηλεκτρονίων

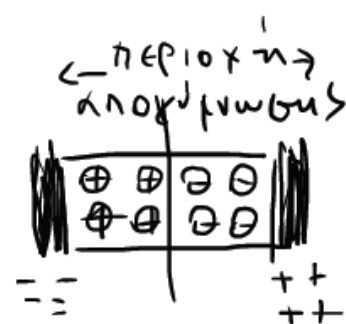
L_p, L_n "μήκη διάχυσης" (είναι μερικά μισρόμετρα)



Η περιοχή αποχύμωσης μεγαλώνει
 γίνεται βολών αδύνατο να περάσουν
 ελεύθερα ηλεκτρόνια από την περιοχή
 N στην περιοχή P και οπές από την
 περιοχή P στην περιοχή N.

Η διαδοσ δεν έχει

Συνεπώς ότι δημιουργείται ένας πυκνωτής:



$$C = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 - \frac{V_R}{V_0}}}$$

V_R = η τάση αναστροφής πρόωσης

V_0 = η τάση 0.6 - 0.7V που υπάρχει χωρίς πρόωση στην διέσπαση
 και C_{j0} = η χωρητικότητα της περιοχής αποχύμωσης χωρίς πρόωση