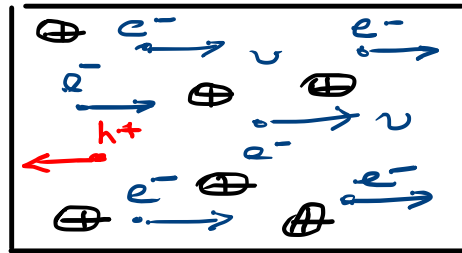


# Μεταφορά φορτίων εντός του ημιαγωγού

ημιαγωγός τύπου n:



Θάβουμε εξωτερικό  
ηλεκτρικό πεδίο  
της ίδιας φοράς  
που έγινε που έζησε

● Πολλά ελεύθερα  
ηλεκτρόνια  $e^-$

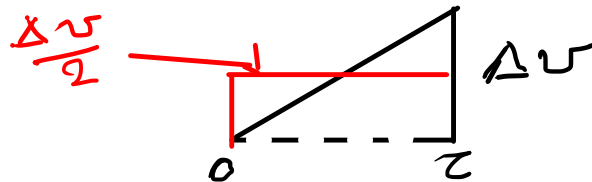
● Δυσκολία θετικών  
φορτίων τόσων

όσα τα ελεύθερα

ηλεκτρόνια  $\oplus$

● λίγες ελεύθερες

οπές  $h^+$



η "μέση ταχύτητα ολίσθησης" είναι

$$\frac{\Delta v}{2}$$

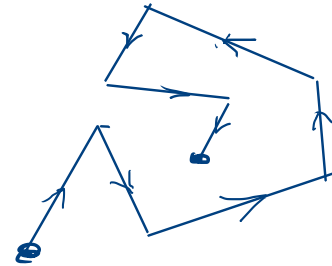
$$v_{drift} = \frac{q_e E \tau}{2 m_e}$$

$$v_{drift} = \mu_e \cdot E \quad \mu_e: \text{επιμετατότητα (mobility)} \\ \text{των ελεύθερων ηλεκτρονίων}$$

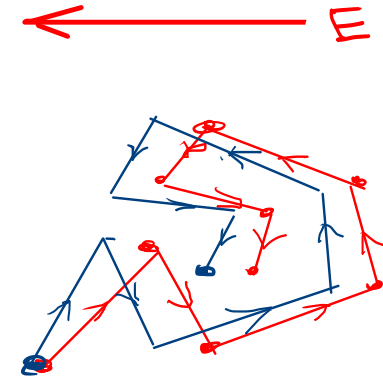
$$\mu_e = \frac{q_e \tau}{2 m_e}$$

$$\mu_e = 1500 \frac{cm^2}{V \cdot s} \quad \text{για } 27^\circ C \text{ στο } Si$$

Θερμική κίνηση ηλεκτρονίων για ηλ. πεδίο  $E=0$



Θερμική κίνηση ηλεκτρονίων για ηλ. πεδίο  $E \neq 0$



μεσα στο ηλ. πεδίο τα ηλεκτρόνια (και οι οπές) έχουν και θερμική κίνηση και ολίσθηση εξαιτίας του πεδίου.

Αν ο μέσος χρόνος μεταξύ δύο συγκρούσεων του ηλεκτρονίου είναι  $\tau$ , τότε η δύναμη λόγω του ηλ. πεδίου δίνει:

$$F = q_e E = \frac{\Delta p}{\tau} = \frac{m_e \cdot \Delta v}{\tau} \Leftrightarrow$$

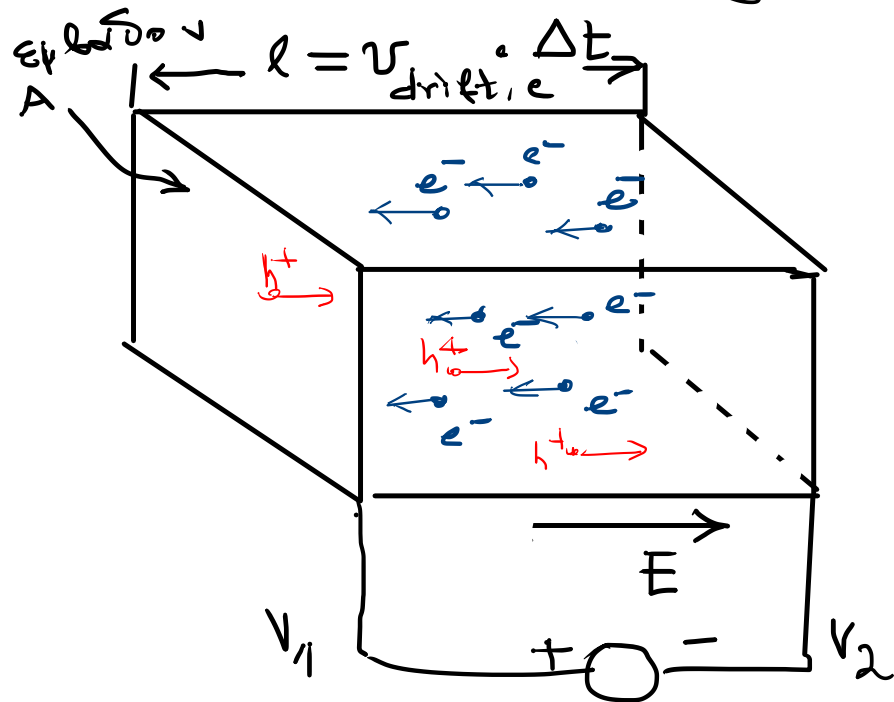
$$\Delta v = \frac{q_e \cdot E \cdot \tau}{m_e}$$

το ίδιο γίνεται και με τις οπές:  $v_{drift,h} = \frac{q_e \cdot z_h}{2 m_h} E = \mu_h \cdot E$  ;  $\mu_h = 450 \frac{cm^2}{V \cdot s}$

$$m_e = 0.26 \cdot 9 \cdot 10^{-31} kg$$

$$m_h = 0.36 \cdot 9 \cdot 10^{-31} kg, \quad q_e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$$

στο Si



$$V_1 > V_2$$

$$I = \frac{\text{φορτίο ηλεκτρονίων + οπών που περνάει σε χρόνο } \Delta t \text{ μέσα από την επιφάνεια } A}{\Delta t}$$

Το φορτίο ηλεκτρονίων είναι:  
(φορτίο ενός ηλεκτρονίου  $q_e$ ) \* (αριθμός ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου  $n_e$ ) \* (όγκος:  $A \cdot l = A \cdot v_{drift,e} \Delta t$ )

$$Q_e = |q_e| \cdot n_e \cdot A \cdot v_{drift,e} \cdot \Delta t$$

Το φορτίο των οπών είναι  $|q_e| \cdot n_h \cdot v_{drift,h} \Delta t$

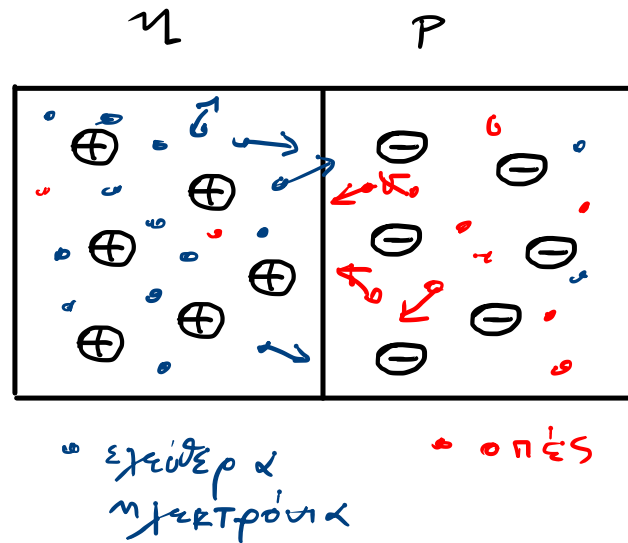
όρα πυκνότητα ρεύματος  $[\frac{A}{m^2}]$

$$J = \frac{I}{A} = \frac{|q_e| \cdot n_e \cdot v_e \cdot \Delta t + |q_e| \cdot n_h \cdot v_h \cdot \Delta t}{\Delta t} = |q_e| (n_e \cdot v_e + n_h \cdot v_h)$$

( $v = \mu \cdot E$ ) άρα ε: ειδική αγωγιμότητα

$$J = |q_e| (n_e \mu_e + n_h \mu_h) E = \sigma \cdot E \quad \text{όπου: } \frac{1}{\sigma} = \rho : \text{ειδική αντίσταση}$$

όταν αυξάνεται η θερμοκρασία αυξάνεται η συγκέντρωση των ελευθέρων ηλεκτρονίων και οπών, οπότε αυξάνεται η αγωγιμότητα και μειώνεται η αντίσταση των ημιαγωγών σε αντίθεση με ο,τι συμβαίνει στα μέταλλα για τα οποία αυξάνεται η αντίσταση, όταν μεγαλώνει η θερμοκρασία



Στην περιοχή απογύμνωσης το ρεύμα λόγω διάχυσης των οπών και το ρεύμα λόγω ολίσθησής τους είναι ίσα (και αντίθετα)

$$P \cdot \mu_p \cdot E = D_p \frac{dp}{dx}$$

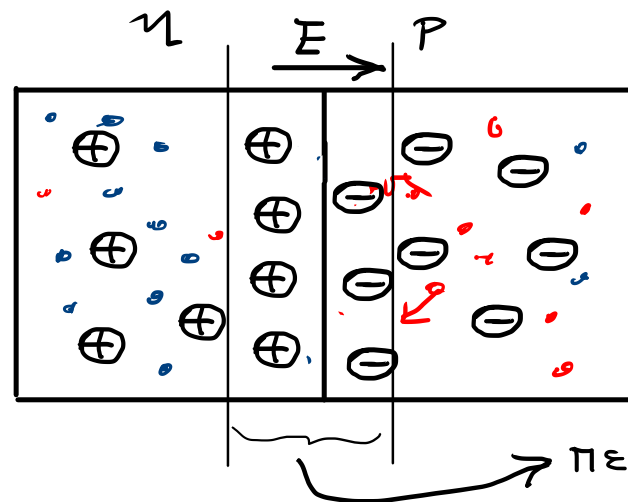
$$E = - \frac{dV}{dx}$$

αρχ

$$P \cdot \mu_p \left( - \frac{dV}{dx} \right) = D_p \frac{dp}{dx}$$

Το ρεύμα διάχυσης είναι ανάλογο της διαφοράς συγκέντρωσης ΔP προς την απόσταση Δx (Dp η σταθερά λυαλογιάς)

Εξαιτίας της διάχυσης τα ελεύθερα ηλεκτρόνια περνούν στην περιοχή p και οι οπές στην περιοχή n. Στην διεπαφή των δύο περιοχών τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επανασυνδέονται με τις οπές και έτσι δημιουργείται μια ζώνη απογυμνωμένη από ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές

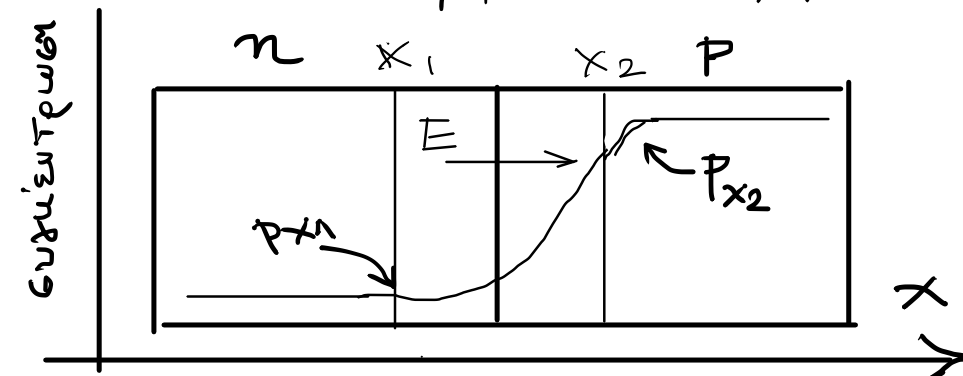


Η περιοχή απογύμνωσης με το ηλ. πεδίο της εμποδίζει πια τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να εισχωρήσουν στην περιοχή p και τις οπές στην περιοχή n

$$\alphaρχ: - p \mu_p dV = D_p dp \quad \text{και}$$

$$- \mu_p \int_{V_{x1}}^{V_{x2}} dV = D_p \int_{P_{x1}}^{P_{x2}} \frac{dp}{p} \quad \text{δηλ}$$

$$V_{x1} - V_{x2} = \frac{D_p}{\mu_p} \ln \left( \frac{P_{x2}}{P_{x1}} \right)$$



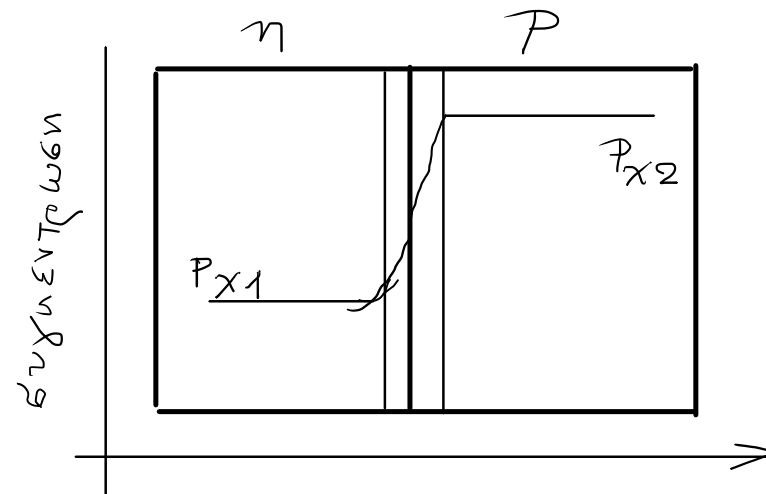
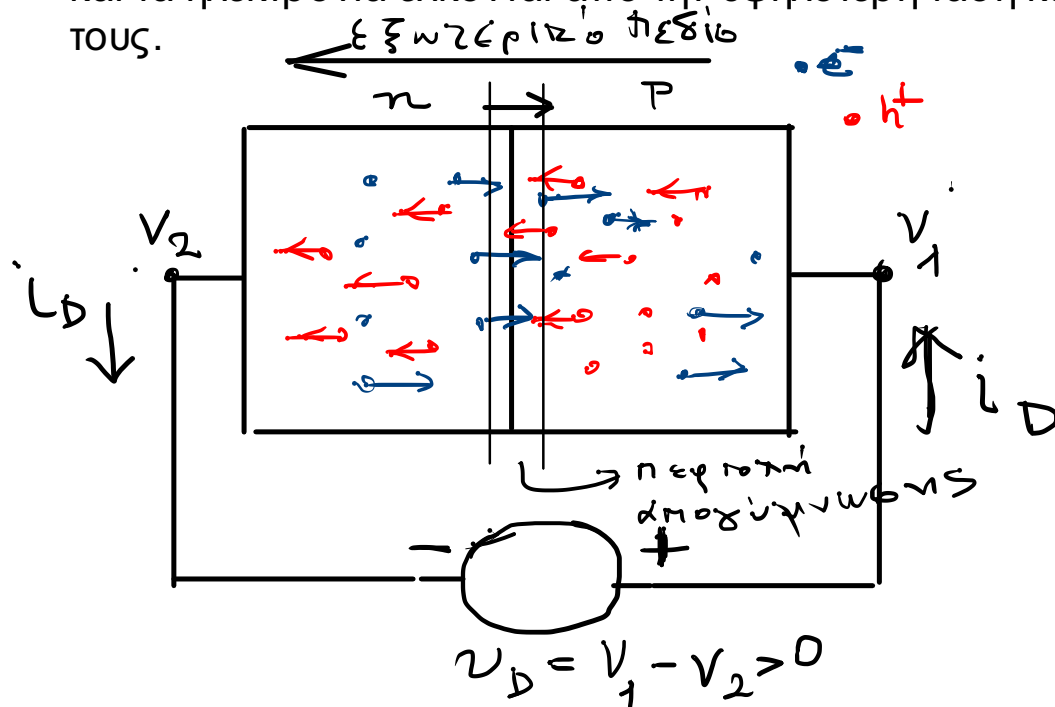
Για την συγκέντρωση των οπών στην περιοχή η ισχύει  $p_{x1} \cdot n_{x1} = n_i^2$   
 ( $n_i^2 = \frac{10^{20}}{\text{cm}^3}$ ) άρα  $p_{x1} = \frac{n_i^2}{n_{x1}}$  Επίσης ισχύει ότι:  $D_p = \mu_p \frac{kT}{q_e}$

άρα η σχέση  $V_{x1} - V_{x2} = \frac{D_p}{\mu_p} \ln\left(\frac{p_{x2}}{p_{x1}}\right)$  δίνεται:

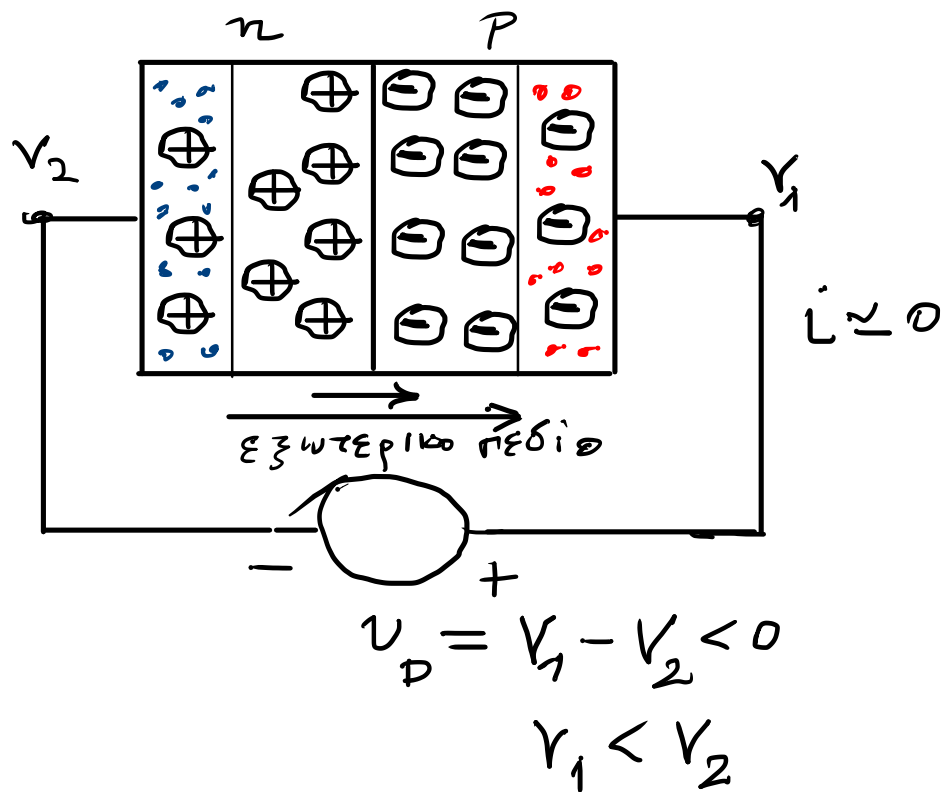
$$V_{x1} - V_{x2} = \frac{kT}{q_e} \ln \frac{p_{x2} \cdot n_{x1}}{n_i^2} \quad \text{Για } p_{x2} = n_{x1} = 10^{15} / \text{cm}^3$$

$$V_{x1} - V_{x2} \approx 26 \text{ mV} \cdot \ln \frac{10^{15} \cdot 10^{15}}{10^{20}} \approx 600 \text{ mV}$$

Όταν βάλουμε μια εξωτερική τάση που δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο αντίθετο, τότε η περιοχή απογύμνωσης μικραίνει και τα ηλεκτρόνια έλκονται από την υψηλότερη τάση και οι οπές από την χαμηλότερη και δεν εμποδίζεται η κίνησή τους.



η  $p_{x1}$  τώρα είναι μεγαλύτερη



Στην ανάστροφη πόλωση το εξωτερικό ηλ. πεδίο μεγαλώνει την περιοχή απογύμνωσης με αποτέλεσμα να μην μπορούν ηλεκτρόνια να περάσουν στην περιοχή p, ούτε οπές να μπορούν να περάσουν στην περιοχή n, έτσι το ρεύμα είναι 0

Το ρεύμα ορθής πόλωσης

$$I_D = I_s \left( e^{\frac{V_D}{n k T / q_e}} - 1 \right) \text{ έχει}$$

$$I_s = A \cdot q_e \cdot n_i^2 \cdot \left( \frac{D_n}{N_A \cdot L_A} + \frac{D_p}{N_D \cdot L_D} \right)$$

όπου  $A$ : το εμβαδόν της διατομής  
 $q_e: 1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$  (φορτίο ηλεκτρονίου)

$$D_n = \frac{kT}{q_e} \cdot \mu_n, \quad D_p = \frac{kT}{q_e} \cdot \mu_p$$

$N_A, N_D$  οι συγκεντρώσεις των νοθεύσεων  
 $\oplus \quad \ominus$   $L_p, L_n$  είναι τα ημίκυκλα διάχυσης,  
 και είναι μερικά  $\mu\text{m}$