

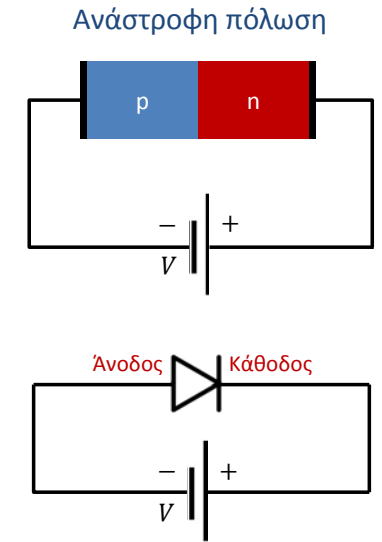
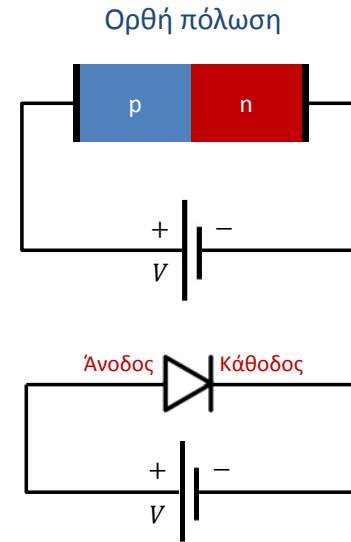
# Ανάστροφη πόλωση της επαφής p-n

Δ. Γ. Παπαγεωργίου  
Τμήμα Μηχανικών Επιστήμης Υλικών  
Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων

dpageo@uoi.gr  
<http://pc164.materials.uoi.gr/dpageo>

1

## Δύο τρόποι πόλωσης της επαφής p-n



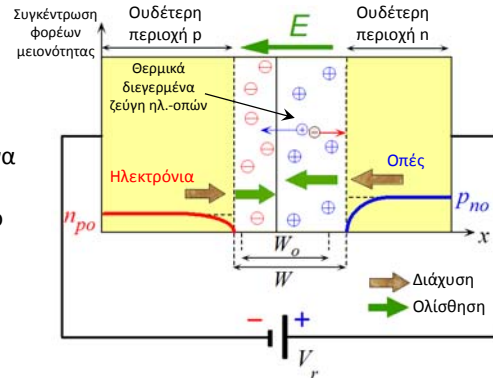
Ημιαγώγιμα και διηλεκτρικά υλικά

2

Ανάστροφη πόλωση της επαφής p-n

## Επαφή p-n – Ανάστροφη πόλωση

- Πολώνουμε τη δίοδο με τάση  $V = -V_r$  ( $V_r > 0$ )
- Ο αρνητικός πόλος έλκει οπές από την περιοχή p.
- Η κίνηση των οπών δεν μπορεί να διατηρηθεί αφού δεν υπάρχει αντίστοιχη παροχή φορέων από το άλλο άκρο.
- Όμοια ο θετικός πόλος έλκει ηλεκτρόνια από την περιοχή n.
- Η κίνηση των ηλεκτρονίων δεν μπορεί να διατηρηθεί αφού δεν υπάρχει αντίστοιχη παροχή φορέων από το άλλο άκρο.



Ημιαγώγιμα και διηλεκτρικά υλικά

3

Ανάστροφη πόλωση της επαφής p-n

## Περιοχή απογύμνωσης στην ανάστροφη πόλωση

Το δυναμικό στην περιοχή απογύμνωσης είναι  $V_0 + V_r$

Υπενθύμιση: Το εύρος της περιοχής απογύμνωσης δίνεται από:

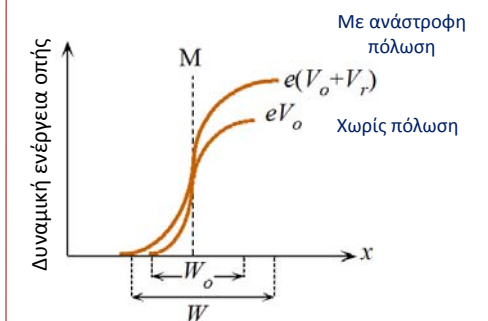
$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V_0 + V_r)}{e} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}$$

Υπενθύμιση: Η μέγιστη τιμή του ηλεκτρικού πεδίου δίνεται από:

$$E = -\sqrt{\frac{2(V_0 + V_r)e}{\varepsilon} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}$$

Αποτέλεσμα της ανάστροφης πόλωσης:

- Μεγαλύτερη περιοχή απογύμνωσης
- Μεγαλύτερο ηλεκτρικό πεδίο.



Ημιαγώγιμα και διηλεκτρικά υλικά

4

Ανάστροφη πόλωση της επαφής p-n

## Ανάστροφο ρεύμα λόγω διάχυσης

Το μικρό πλήθος οπών κοντά στην περιοχή απογύμνωσης στην πλευρά n μεταφέρεται απέναντι εξαιτίας του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Από το νόμο της επαφής:

$$p_n(0) = p_{no} e^{-\frac{eV_r}{kT}}$$

Αν  $V_r > \frac{kT}{e} \approx 26mV$  τότε

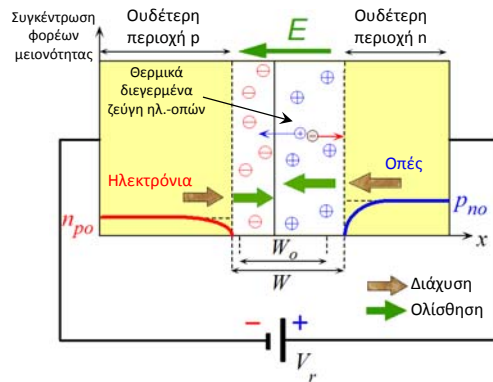
$$e^{-\frac{eV_r}{kT}} \rightarrow 0$$

και συνεπώς

$$p_n(0) \approx 0$$

Στο κύριο σώμα της περιοχής n συγκέντρωση οπών είναι:

$$p_{po} n_{po} = n_i^2 \Rightarrow p_{no} = \frac{n_i^2}{N_d}$$



Υπάρχει βαθμίδα συγκέντρωσης, συνεπώς οπές από την περιοχή n διαχέονται προς το άκρο της περιοχής απογύμνωσης.

Εκεί ολισθαίνουν προς την περιοχή p λόγω του ηλεκτρικού πεδίου.

## Ανάστροφο ρεύμα λόγω διάχυσης

Το ανάστροφο ρεύμα δίνεται από την εξίσωση Shockley:

$$J_D = J_{so} \left( e^{-\frac{eV_r}{kT}} - 1 \right)$$

όπου

$$J_{so} = en_i^2 \left( \frac{D_h}{L_h N_d} + \frac{D_e}{L_e N_a} \right) \text{ Πυκνότητα ανάστροφου ρεύματος κορεσμού}$$

Η σταθερά  $J_{so}$  εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού ( $D_h, D_e, L_h, L_e, n_i$ ), από τη νόθευση ( $N_a, N_d$ ) και εξαρτάται ισχυρά από τη θερμοκρασία.

Αν  $V_r \gg kT/e$  τότε  $e^{-\frac{eV_r}{kT}} \rightarrow 0$  και

$$J_D = -J_{so}$$

## Ανάστροφο ρεύμα λόγω δημιουργίας ηλεκτρονίων-οπών στην περιοχή απογύμνωσης

Στην περιοχή απογύμνωσης δημιουργούνται θερμικά διεγερμένα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών

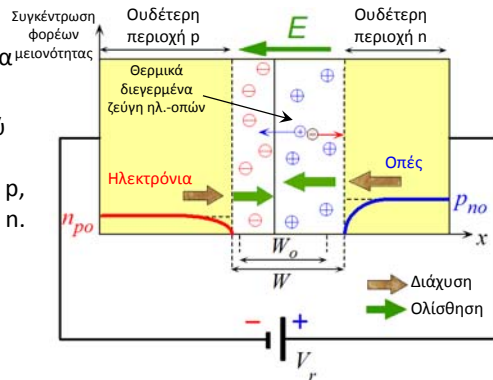
Λόγω της επίδρασης του ηλεκτρικού πεδίου τα ζεύγη διαχωρίζονται. Οι οπές ολισθαίνουν προς την περιοχή p, και τα ηλεκτρόνια προς την περιοχή n.

Το ρεύμα που προκύπτει είναι:

$$J_{gen} = \frac{eWn_i}{\tau_g}$$

όπου  $\tau_g$  είναι ο μέσος χρόνος δημιουργίας ζεύγους ηλεκτρονίου-οπής.

Το ρεύμα  $J_{gen}$  εξαρτάται από το εύρος της περιοχής απογύμνωσης και άρα από την εφαρμοζόμενη τάση  $V_r$



## Ολικό ανάστροφο ρεύμα

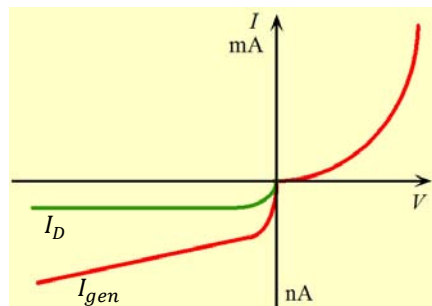
Το ολικό ανάστροφο ρεύμα είναι το άθροισμα του ρεύματος λόγω διάχυσης και λόγω θερμικής διέγερσης ζευγών ηλεκτρονίων-οπών.

$$J_{rev} = J_D + J_{gen}$$

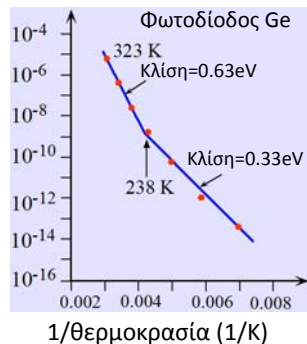
$$en_i^2 \left( \frac{D_h}{L_h N_d} + \frac{D_e}{L_e N_a} \right) + \frac{eWn_i}{\tau_g}$$

Η σημαντικότητα του κάθε όρου εξαρτάται από τις ιδιότητες του ημιαγώγου και τη θερμοκρασία.

## Ολικό ανάστροφο ρεύμα



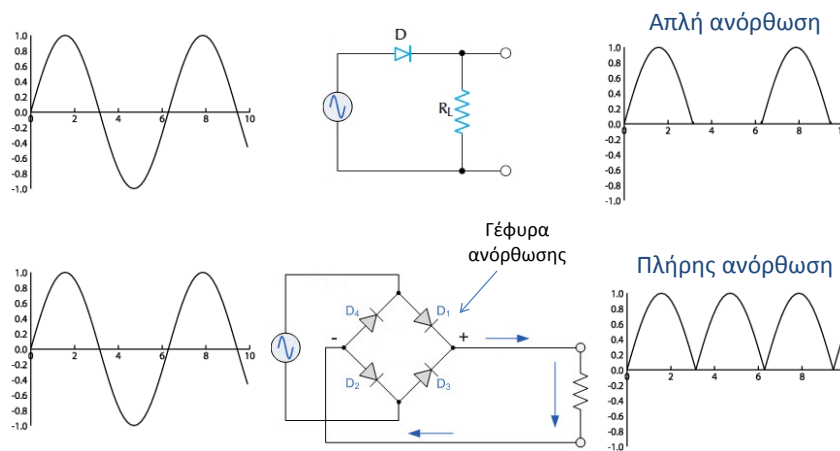
Χαρακτηριστική I-V μιας διόδου σε συνθήκες ορθής και ανάστροφης πόλωσης. Ο θετικός και ο αρνητικός άξονας των ρευμάτων έχουν διαφορετική κλίμακα.



Ανάστροφο ρεύμα σε μια δίοδο Ge ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Πάνω από τους 238K το ρεύμα εξαρτάται από το  $n_i^2$  ενώ κάτω από τους 238K εξαρτάται από το  $n_i$

## Εφαρμογή: Μετατροπή εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές (ανόρθωση)

Για όλες τις πρακτικές εφαρμογές η δίοδος θεωρείται ότι άγει ρεύμα όταν είναι ορθά πολωμένη, αλλά όχι όταν είναι ανάστροφα



## Παράδειγμα #1

Ιδανική δίοδος πυριτίου p-n έχει συγκέντρωση δοτών  $10^{16}/\text{cm}^3$ . Ποια είναι η συγκέντρωση των οπών στο όριο μεταξύ περιοχής απογύμνωσης και ουδέτερης περιοχής n όταν η δίοδος πολώνεται ανάστροφα με τάση **0.5V**;

Θα εφαρμόσουμε το νόμο της επαφής

$$p_n(0) = p_{no} e^{\frac{eV}{kT}}$$

Για τη συγκέντρωση  $p_{no}$  θα εφαρμόσουμε το νόμο δράσης των μαζών:

$$p_{no} n_{no} = n_i^2$$

Όμως  $n_{no} = N_d$

$$p_{no} N_d = n_i^2 \Rightarrow$$

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



Συνεπώς ο νόμος της επαφής γράφεται:

$$p_n(0) = \frac{n_i^2}{N_d} e^{\frac{eV}{kT}}$$

## Παράδειγμα #1

Χρειαζόμαστε:

$$kT/e = 0.0259V$$

$$n_i = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

Αντικαθιστούμε:

$$p_n(0) = \frac{n_i^2}{N_d} e^{\frac{eV}{kT}} \Rightarrow$$

$$p_n(0) = \frac{(10^{10} \text{ cm}^{-3})^2}{10^{16} \text{ cm}^{-3}} e^{\frac{-0.5V}{0.0259V}} =$$

$$(10^4 \text{ cm}^{-3})(4.1 \times 10^{-9}) =$$

$$4.1 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-3}$$

## Παράδειγμα #2

Η συγκέντρωση ηλεκτρονίων στην περιοχή p σε ιδανική δίοδο p-n χωρίς πόλωση είναι  $5 \times 10^5 \text{cm}^{-3}$ . Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στο όριο μεταξύ περιοχής απογύμνωσης και ουδέτερης περιοχής p όταν η δίοδος πολώνεται ανάστροφα είναι  $2 \times 10^{-4} \text{cm}^{-3}$ . Ποια είναι η τάση πόλωσης;

Θα χρησιμοποιήσουμε το νόμο της επαφής

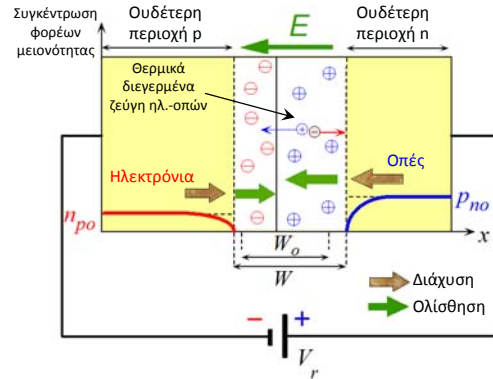
$$n_p(0) = n_{po} e^{\frac{eV}{kT}}$$

Λύνουμε ως προς V

$$\frac{n_p(0)}{n_{po}} = e^{\frac{eV}{kT}} \Rightarrow$$

$$\ln \frac{n_p(0)}{n_{po}} = \frac{eV}{kT} \Rightarrow$$

$$V = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_p(0)}{n_{po}}$$



## Παράδειγμα #2

Χρειαζόμαστε:

$$kT/e = 0.0259V$$

Αντικαθιστούμε:

$$V = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_p(0)}{n_{po}} \Rightarrow$$

$$V = 0.0259V \ln \frac{2 \times 10^{-4} \text{cm}^{-3}}{5 \times 10^5 \text{cm}^{-3}} =$$

$$0.0259V (-26.1) =$$

$$-0.56 V$$

## Παράδειγμα #3

Ποια τάση πρέπει να εφαρμόσουμε σε ιδανική δίοδο p-n ώστε η συγκέντρωση οπών στο όριο της περιοχής απογύμνωσης με την ουδέτερη περιοχή n να είναι **1000** φορές μικρότερη από τη συγκέντρωση οπών ισορροπίας;

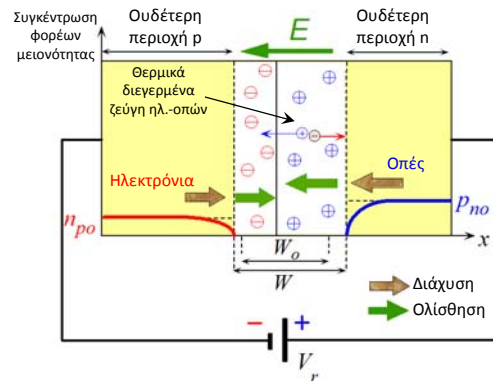
Θα εφαρμόσουμε το νόμο της επαφής:

$$p_n(0) = p_{no} e^{\frac{eV}{kT}} \Rightarrow$$

$$\frac{p_n(0)}{p_{no}} = e^{\frac{eV}{kT}} \Rightarrow$$

$$\ln \frac{p_n(0)}{p_{no}} = \frac{eV}{kT} \Rightarrow$$

$$V = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_n(0)}{p_{no}}$$



## Παράδειγμα #3

Χρειαζόμαστε:

$$kT/e = 0.0259V$$

Αντικαθιστούμε:

$$V = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_n(0)}{p_{no}} \Rightarrow$$

$$V = 0.0259V \ln \frac{1}{1000} =$$

$$0.0259V (-6.91) =$$

$$-0.18 V$$

## Παράδειγμα #4

Ιδανική δίοδος p-n διαρρέεται από ρεύμα **1mA** όταν πολωθεί ορθά με τάση **0.6V**. Ποιο είναι το ρεύμα λόγω διάχυσης αν η δίοδος πολωθεί ανάστροφα με τάση **2V** ;

Το ρεύμα δίνεται από την εξίσωση Shockley

$$I = I_{so} \left( e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

$I_{so}$  ανάστροφο ρεύμα κορεσμού

Για μεγάλες αρνητικές τάσεις, δηλαδή  $|V| \gg \frac{kT}{e}$  παίρνουμε

$$I = -I_{so}$$

Συνεπώς πρέπει να βρούμε το  $I_{so}$

Στην ορθή πόλωση

$$I = I_{so} \left( e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) \Rightarrow$$

$$I \approx I_{so} e^{\frac{eV}{kT}} \Rightarrow$$

$$I_{so} = \frac{I}{e^{\frac{eV}{kT}}} =$$

$$\frac{1mA}{e^{\frac{0.6V}{0.0259V}}} =$$

$$8.7 \times 10^{-14} A$$

## Παράδειγμα #5 (Ορθή και ανάστροφη πόλωση δίοδου Si)

Μια δίοδος πυριτίου p+n έχει διατομή **1mm<sup>2</sup>**, συγκέντρωση αποδεκτών  **$N_a=5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$**  και συγκέντρωση δωτών  **$N_d=10^{16}/\text{cm}^3$** . Ο μέσος χρόνος ζωής των οπών την περιοχή n είναι **417ns**, ενώ των ηλεκτρονίων στην περιοχή p είναι **5ns** λόγω μεγαλύτερης συγκέντρωσης προσμίξεων (κέντρα επανασύνδεσης) σε αυτή την πλευρά. Ο μέσος χρόνος θερμικής διέγερσης  $\tau_g$  είναι περίπου **1μs**. Τα μήκη των περιοχών p και n είναι **5** και **100 microns** αντίστοιχα.

- Υπολογίστε τα μήκη διάχυσης των φορέων μειονότητας και προσδιορίστε τι τύπος δίοδου είναι (μεγάλου ή μικρού μήκους).
- Πόσο είναι το εσωτερικό δυναμικό ;
- Πόσο είναι το ρεύμα με ορθή πόλωση 0.6V σε θερμοκρασία 27C; Υποθέστε ότι το ρεύμα οφείλεται στη διάχυση φορέων μειονότητας.
- Εκτιμήστε το ρεύμα στους 100C όταν η τάση στη δίοδο είναι 0.6V. Υποθέστε ότι η θερμοκρασιακή εξάρτηση του  $n_i$  υπερισχύει αυτών των D, L,  $\mu$
- Πόσο είναι το ανάστροφο ρεύμα για ανάστροφη τάση 5V;

## Παράδειγμα #5.a – Μήκη διάχυσης

- Υπολογίστε τα μήκη διάχυσης των φορέων μειονότητας και προσδιορίστε τι τύπος δίοδου είναι.

Το μήκος διάχυσης είναι

$$L = \sqrt{D\tau}$$

Όπου

D συντελεστής διάχυσης

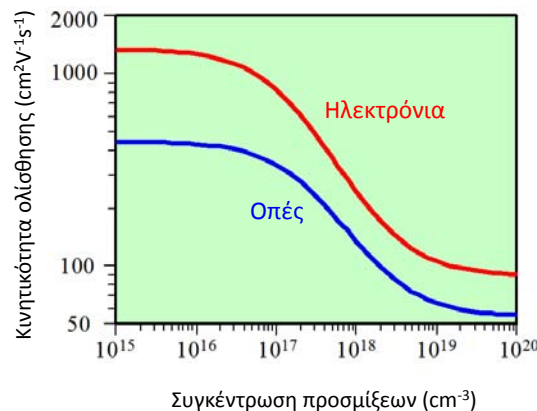
$\tau$  μέσος χρόνος ζωής των φορέων

Ο συντελεστής διάχυσης D σχετίζεται με την κινητικότητα  $\mu$  με τη σχέση Einstein

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e}$$

Για να υπολογίσουμε το μήκος L χρειαζόμαστε επιπλέον και την κινητικότητα  $\mu$

## Παράδειγμα #5.a – Μήκη διάχυσης



Για τα ηλεκτρόνια, όταν  $N_a=5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$  βλέπουμε ότι  $\mu_e=120\text{cm}^2/\text{V/s}$

Για τις οπές, όταν  $N_d=10^{16}/\text{cm}^3$  βλέπουμε ότι  $\mu_h=440\text{cm}^2/\text{V/s}$

Μεταβολή της κινητικότητας ολίσθησης με τη συγκέντρωση των προσμίξεων στο Si για τα ηλεκτρόνια και τις οπές.

## Παράδειγμα #5.a – Μήκη διάχυσης

Χρειαζόμαστε:

$$kT/e = 0.0259V$$

Συντελεστής διάχυσης ηλεκτρονίων:

$$D_e = \frac{kT}{e} \mu_e \Rightarrow$$

$$D_e = (0.0259V) \left( 120 \frac{cm^2}{Vs} \right) = 3.1 \frac{cm^2}{s}$$

Μήκος διάχυσης ηλεκτρονίων:

$$L_e = \sqrt{D_e \tau_e} \Rightarrow$$

$$L_e = \sqrt{\left( 3.1 \frac{cm^2}{s} \right) (5 \times 10^{-9}s)} \Rightarrow$$

$$L_e = \sqrt{1.55 \times 10^{-8} cm^2} \Rightarrow$$

$$L_e = 1.24 \times 10^{-4} cm = 1.24 \mu m$$

Συντελεστής διάχυσης οπών:

$$D_h = \frac{kT}{e} \mu_h \Rightarrow$$

$$D_h = (0.0259V) \left( 440 \frac{cm^2}{Vs} \right) = 11.4 \frac{cm^2}{s}$$

Μήκος διάχυσης οπών:

$$L_h = \sqrt{D_h \tau_h} \Rightarrow$$

$$L_h = \sqrt{\left( 11.4 \frac{cm^2}{s} \right) (417 \times 10^{-9}s)} \Rightarrow$$

$$L_h = \sqrt{4.75 \times 10^{-6} cm^2} \Rightarrow$$

$$L_h = 22 \times 10^{-4} cm = 21.8 \mu m$$

Επειδή  $L_e = 1.24 \mu m < 5 \mu m$

και  $L_h = 21.8 \mu m < 100 \mu m$

συμπεραίνουμε ότι είναι μεγάλη δίοδος

## Παράδειγμα #5.b – Εσωτερικό δυναμικό

b. Πόσο είναι το εσωτερικό δυναμικό ;

Το εσωτερικό δυναμικό δίνεται από:

$$V_0 = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

Χρειαζόμαστε:

$$n_i = 10^{10} cm^{-3}$$

$$V_0 = (0.0259V) \ln \frac{(5 \times 10^{18} cm^{-3})(10^{16} cm^{-3})}{(10^{10} cm^{-3})^2} \Rightarrow$$

$$V_0 = 0.0259V \times \ln(5 \times 10^{14}) \Rightarrow$$

$$V_0 = 0.877V$$

## Παράδειγμα #5.c – Ορθό ρεύμα

c. Πόσο είναι το ρεύμα με ορθή πόλωση 0.6V σε θερμοκρασία 27C; Υποθέστε ότι το ρεύμα οφείλεται στη διάχυση φορέων μειονότητας.

Η πυκνότητα ρεύματος λόγω διάχυσης των φορέων μειονότητας στις ουδέτερες περιοχές δίνεται από την εξίσωση Shockley:

$$J = J_{so} \left( e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

$$J_{so} = en_i^2 \left( \frac{D_h}{L_h N_d} + \frac{D_e}{L_e N_a} \right)$$

$$\text{Επειδή } V = 0.6V \gg \frac{kT}{e} = 0.0259V$$

μπορούμε να γράψουμε:

$$J = J_{so} e^{\frac{eV}{kT}}$$

Επίσης επειδή  $N_a \gg N_d$  η σταθερά  $J_{so}$  γίνεται:

$$J_{so} \approx en_i^2 \frac{D_h}{L_h N_d}$$

Το ρεύμα οφείλεται κυρίως στη διάχυση οπών στην περιοχή n.

## Παράδειγμα #5.c – Ορθό ρεύμα

Θα υπολογίσουμε πρώτα την πυκνότητα του αναστροφικού ρεύματος κορεσμού:

$$J_{so} = en_i^2 \frac{D_h}{L_h N_d}$$

Χρειαζόμαστε:

$$n_i = 10^{10} cm^{-3}$$

$$e = 1.6 \times 10^{-19} C$$

$$J_{so} = (1.6 \times 10^{-19} C) (10^{10} cm^{-3})^2 \frac{11.4 \frac{cm^2}{s}}{(21.8 \times 10^{-4} cm) (10^{16} cm^{-3})} \Rightarrow$$

$$J_{so} = 8.37 \times 10^{-12} \frac{C}{s cm^2} \Rightarrow$$

$$J_{so} = 8.37 \times 10^{-12} \frac{A}{cm^2}$$



## Παράδειγμα #5.c – Ορθό ρεύμα

Μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε την πυκνότητα ρεύματος:

$$J = J_{so} e^{\frac{eV}{kT}} \Rightarrow$$

$$J = \left( 8.37 \times 10^{-12} \frac{A}{cm^2} \right) e^{\frac{0.6V}{0.0259V}} \Rightarrow$$

$$J = \left( 8.37 \times 10^{-12} \frac{A}{cm^2} \right) (11.5 \times 10^9) = 0.096 \frac{A}{cm^2}$$

Το ρεύμα είναι:

$$I = AJ \Rightarrow$$

$$I = (1mm^2) \left( 0.096 \frac{A}{cm^2} \right) \Rightarrow$$

$$I = (0.01cm^2) \left( 0.096 \frac{A}{cm^2} \right) \Rightarrow$$

$$I = 0.96 \times 10^{-3} A = 0.96 mA$$

## Παράδειγμα #5.d – Ορθό ρεύμα στους 100C

d. Εκτιμήστε το ρεύμα στους 100C όταν η τάση στη δίοδο είναι 0.6V. Υποθέστε ότι η θερμοκρασιακή εξάρτηση του  $n_i$  υπερισχύει αυτών των D, L,  $\mu$

Η πυκνότητα ρεύματος σε θερμοκρασία T είναι:

$$J(T) = J_{so} e^{\frac{eV}{kT}}$$

Η σταθερά  $J_{so}$  σε θερμοκρασία T είναι:

$$J_{so}(T) \approx en_i^2(T) \frac{D_h}{L_h N_d} \quad (1)$$

Σε μια άλλη θερμοκρασία  $T_1$  είναι:

$$J_{so}(T_1) \approx en_i^2(T_1) \frac{D_h}{L_h N_d} \quad (2)$$

Διαιρώντας την (1) με τη (2)

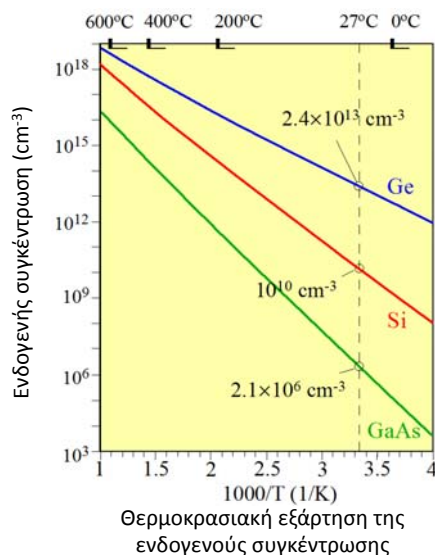
$$\frac{J_{so}(T)}{J_{so}(T_1)} = \frac{n_i^2(T)}{n_i^2(T_1)} \Rightarrow$$

$$J_{so}(T) = J_{so}(T_1) \frac{n_i^2(T)}{n_i^2(T_1)} \\ = J_{so}(T_1) \left( \frac{n_i(T)}{n_i(T_1)} \right)^2$$

Εδώ  $T = 373K$ ,  $T_1 = 300K$

Χρειαζόμαστε την ενδογενή συγκέντρωση  $n_i$  σε θερμοκρασία  $T = 100C = 373K$

## Παράδειγμα #5.d – Ορθό ρεύμα στους 100C



Από το διάγραμμα μπορούμε να δούμε ότι:  
για  $T=373K$ , δηλαδή  $1000/T=2.68/K$  η ενδογενής συγκέντρωση του Si είναι  $n_i=1.2 \times 10^{12}/cm^3$

## Παράδειγμα #5.d – Ορθό ρεύμα στους 100C

$$J_{so}(T) = J_{so}(T_1) \left( \frac{n_i(T)}{n_i(T_1)} \right)^2 \Rightarrow$$

$$J_{so}(373K) = J_{so}(300K) \left( \frac{n_i(373K)}{n_i(300K)} \right)^2 \Rightarrow$$

$$J_{so}(373K) = \left( 8.37 \times 10^{-12} \frac{A}{cm^2} \right) \left( \frac{1.2 \times 10^{12} cm^{-3}}{10^{10} cm^{-3}} \right)^2 \Rightarrow$$

$$J_{so}(373K) = 1.2 \times 10^{-7} \frac{A}{cm^2}$$

Τώρα μπορούμε να υπολογίσουμε την πυκνότητα ρεύματος:

$$J(373K) = J_{so}(373K) e^{\frac{eV}{kT}} \Rightarrow$$

$$J(373K) = \left( 1.2 \times 10^{-7} \frac{A}{cm^2} \right) e^{\frac{(1.6 \times 10^{-19} C)(0.6V)}{(1.38 \times 10^{-23} J/K)(373K)}} \Rightarrow$$

$$J(373K) = \left( 1.2 \times 10^{-7} \frac{A}{cm^2} \right) (12.6 \times 10^7) = 15 \frac{A}{cm^2}$$

## Παράδειγμα #5.d – Ορθό ρεύμα στους 100C

Υπολογίζουμε το ρεύμα:

$$I(373K) = AJ(373K) \Rightarrow$$

$$I(373K) = (1\text{mm}^2) \left( 15 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \right) \Rightarrow$$

$$I(373K) = (0.01\text{cm}^2) \left( 15 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \right) \Rightarrow$$

$$I(373K) = 0.15\text{A} = \mathbf{150\text{mA}}$$

**Το ρεύμα αυξήθηκε 150 φορές !!**

## Παράδειγμα #5.e – Ανάστροφο ρεύμα

ε. Πόσο είναι το ανάστροφο ρεύμα για ανάστροφη τάση 5V;

Το ανάστροφο ρεύμα έχει δύο συνιστώσες:

- Ανάστροφο ρεύμα λόγω διάχυσης.
- Ανάστροφο ρεύμα λόγω θερμικής διέγερσης ζευγών ηλεκτρονίων-οπών.

Έχουμε ήδη υπολογίσει το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού:

$$J_{so} = 8.37 \times 10^{-12} \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$$

Άρα:

$$I_{so} = AJ_{so} \Rightarrow$$

$$I_{so} = (1\text{mm}^2 \times 8.37) \left( 10^{-12} \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \right) \Rightarrow$$

$$I_{so} = (0.01\text{cm}^2) \left( 8.37 \times 10^{-12} \frac{\text{A}}{\text{cm}^2} \right) \Rightarrow$$

$$I_{so} = 8.37 \times 10^{-14}\text{A} = \mathbf{0.08\text{pA}}$$

## Παράδειγμα #5.e – Ανάστροφο ρεύμα

Το ανάστροφο ρεύμα λόγω θερμικής διέγερσης ζευγών ηλεκτρονίων-οπών είναι:

$$J_{gen} = \frac{eWn_i}{\tau_g}$$

Πρέπει να υπολογίσουμε το πλάτος  $W$  της περιοχής απογύμνωσης:

$$W = \sqrt{\frac{2eV}{e} \left( \frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}$$

Επειδή  $N_a \gg N_d$

$$W \approx \sqrt{\frac{2eV}{e} \frac{1}{N_a}}$$

Η τάση  $V$  είναι:  $V = V_0 + V_r$

$$W = \sqrt{\frac{2e(V_0 + V_r)}{eN_a}}$$

Η διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon$  γράφεται ως:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0 (V_0 + V_r)}{eN_a}}$$

## Παράδειγμα #5.e – Ανάστροφο ρεύμα

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0 (V_0 + V_r)}{eN_a}} \Rightarrow$$

$$W = \sqrt{\frac{2 \left( 11.9 \times 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \right) (0.877\text{V} + 5\text{V})}{(1.6 \times 10^{-19}\text{C})(10^{16}\text{cm}^{-3})}} \Rightarrow$$

$$W = \sqrt{\frac{774 \times 10^{-9}}{m(10^{-2}\text{m})^{-3}}} \Rightarrow$$

$$W = 0.88 \times 10^{-6}\text{m} =$$

$$\mathbf{0.88\mu\text{m}}$$



## Παράδειγμα #5.e – Ανάστροφο ρεύμα

Εφόσον βρήκαμε το  $W$  μπορούμε να υπολογίσουμε την πυκνότητα ρεύματος λόγω θερμικής διέγερσης ηλεκτρονίων-οπών:

$$J_{gen} = \frac{eWn_i}{\tau_g} \Rightarrow$$

$$J_{gen} = \frac{(1.6 \times 10^{-19}C)(0.88 \times 10^{-6}m)(10^{10}cm^{-3})}{10^{-6}s} \Rightarrow$$

$$J_{gen} = \frac{(1.6 \times 10^{-19}C)(0.88 \times 10^{-6} \times 10^2cm)(10^{10}cm^{-3})}{10^{-6}s} \Rightarrow$$

$$J_{gen} = 1.4 \times 10^{-7} \frac{A}{cm^2}$$

Το ρεύμα είναι:

$$I_{gen} = A J_{gen} \Rightarrow$$

$$I_{gen} = (1mm^2) \left( 1.4 \times 10^{-7} \frac{A}{cm^2} \right) \Rightarrow$$

$$I_{gen} = (0.01cm^2) \left( 1.4 \times 10^{-7} \frac{A}{cm^2} \right) \Rightarrow I_{gen} = 1.4 \times 10^{-9}A = 1.4nA$$

## Παράδειγμα #5.e – Ανάστροφο ρεύμα

Ανάστροφο ρεύμα λόγω διάχυσης:

$$8.37 \times 10^{-14}A$$

Ανάστροφο ρεύμα λόγω θερμικής διέγερσης ζευγών ηλεκτρονίων-οπών:

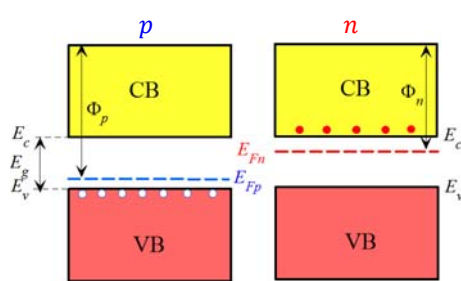
$$1.4 \times 10^{-9}A$$

Το ρεύμα λόγω θερμικής δημιουργίας ζευγών ηλεκτρονίων οπών είναι σχεδόν τέσσερις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού.

Εξακολουθεί όμως και είναι αμελητέο για πρακτικές εφαρμογές.

## Διάγραμμα ζωνών της επαφής p-n χωρίς πόλωση

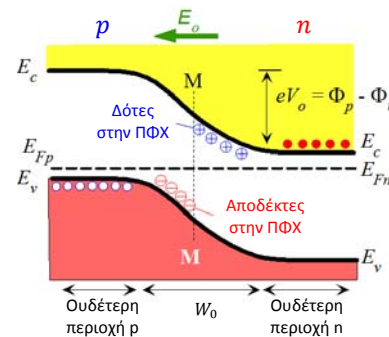
Ανεξάρτητα τμήματα ημιαγωγών p και n



$$p = N_v e^{-\frac{E_F - E_v}{kT}} \quad n = N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}}$$

Διαφορά στις ενέργειες Fermi  $\Delta E_F$  είναι ισοδύναμη με ηλεκτρικό έργο  $e\Delta V$

Επαφή p-n χωρίς πόλωση



Σε σύστημα σε ισορροπία η ενέργεια Fermi είναι ίδια σε όλη τη διάταξη.

## Η ενέργεια Fermi στη δίοδο χωρίς πόλωση

Σε σύστημα σε ισορροπία η ενέργεια Fermi είναι ίδια σε όλη τη διάταξη.

Ας υποθέσουμε ότι η ενέργεια Fermi εξαρτάται από τη θέση, δηλαδή είναι  $E_F(x)$ . Ας εξετάσουμε τα ηλεκτρόνια.

Το ολικό ρεύμα λόγω ολίσθησης και διάχυσης ηλεκτρονίων είναι:

$$J_e = en\mu_e E + eD_e \frac{dn}{dx}$$

Εφαρμόζουμε τη σχέση Einstein:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e} \Rightarrow eD = kT\mu$$

Το ρεύμα γράφεται:

$$J_e = en\mu_e E + kT\mu_e \frac{dn}{dx}$$

Η συγκέντρωση ηλεκτρονίων είναι:

$$n = N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}}$$

Συνεπώς:

$$\frac{dn}{dx} = -N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}} \frac{1}{kT} \left( \frac{dE_c}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right) \Rightarrow$$

$$\frac{dn}{dx} = -\frac{n}{kT} \left( \frac{dE_c}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right)$$

Αντικαθιστούμε στο ρεύμα:

$$J_e = en\mu_e E - n\mu_e \left( \frac{dE_c}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right)$$

## Η ενέργεια Fermi στη δίοδο χωρίς πόλωση

$$J_e = en\mu_e E - n\mu_e \left( \frac{dE_c}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right)$$

Η δύναμη  $F$  που ασκείται στο ηλεκτρόνιο εντός του πεδίου  $E$  είναι:

$$F = -eE$$

Όμως ξέρουμε ότι

$$F = -\frac{dE_c}{dx}$$

Τελικά το ρεύμα είναι:

$$J_e = n\mu_e \frac{dE_c}{dx} - n\mu_e \left( \frac{dE_c}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right) \Rightarrow$$

$$J_e = n\mu_e \frac{dE_F}{dx}$$

Όμως  $J_e = 0$ , συνεπώς

$$\frac{dE_F}{dx} = 0$$

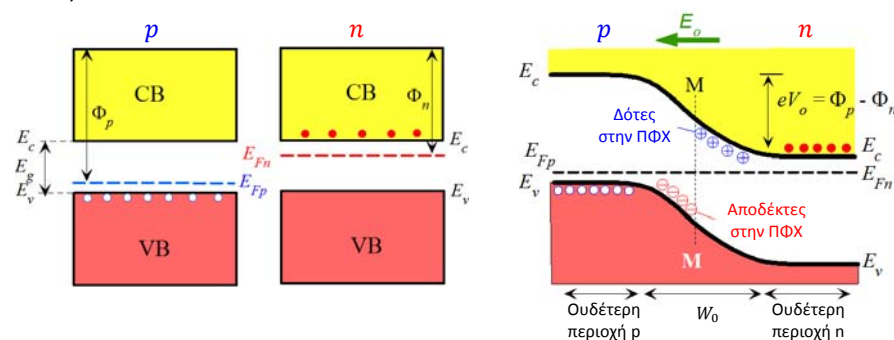
Δηλαδή:

$E_F$  = σταθερό (ανεξάρτητο του  $x$ )

Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε εξετάζοντας το ρεύμα εξαιτίας των οπών  $J_h$

## Το εσωτερικό δυναμικό $V_0$ από το διάγραμμα ζωνών

Θα υπολογίσουμε το εσωτερικό δυναμικό  $V_0$  χρησιμοποιώντας το διάγραμμα ζωνών.



Όταν δημιουργείται η επαφή τα  $E_{Fp}$  και  $E_{Fn}$  πρέπει να μετακινηθούν για να ευθυγραμμιστούν.

Η μετακίνηση είναι η διαφορά στα έργο εξόδου  $\Phi_p - \Phi_n$  και ισοδυναμεί με ηλεκτρικό έργο  $eV_0 = \Phi_p - \Phi_n = (E_c - E_{Fp}) - (E_c - E_{Fn})$

## Το εσωτερικό δυναμικό $V_0$ από το διάγραμμα ζωνών

Γνωρίζουμε ότι η συγκέντρωση ηλεκτρονίων στην περιοχή p δίνεται από:

$$n_{po} = N_c e^{-\frac{E_c - E_{Fp}}{kT}} \Rightarrow$$

$$\frac{n_{po}}{N_c} = e^{-\frac{E_c - E_{Fp}}{kT}} \Rightarrow$$

$$\ln \frac{n_{po}}{N_c} = -\frac{E_c - E_{Fp}}{kT} \Rightarrow$$

$$E_c - E_{Fp} = -kT \ln \frac{n_{po}}{N_c}$$

Όμοια για την περιοχή n:

$$n_{no} = N_c e^{-\frac{E_c - E_{Fn}}{kT}} \Rightarrow$$

$$E_c - E_{Fn} = -kT \ln \frac{n_{no}}{N_c}$$

Η διαφορά στο έργο εξόδου είναι:

$$eV_0 = (E_c - E_{Fp}) - (E_c - E_{Fn}) \Rightarrow$$

$$eV_0 = -kT \ln \frac{n_{po}}{N_c} + kT \ln \frac{n_{no}}{N_c} \Rightarrow$$

$$eV_0 = -kT \left( \ln \frac{n_{po}}{N_c} - \ln \frac{n_{no}}{N_c} \right) \Rightarrow$$

$$eV_0 = -kT \ln \frac{\frac{n_{po}}{N_c}}{\frac{n_{no}}{N_c}} \Rightarrow$$

$$eV_0 = -kT \ln \frac{n_{po}}{n_{no}} \Rightarrow$$

Όμως  $n_{no} = N_d$  και

$$p_{po} n_{po} = n_i^2 \Rightarrow n_{po} = \frac{n_i^2}{p_{po}} = \frac{n_i^2}{N_a}$$

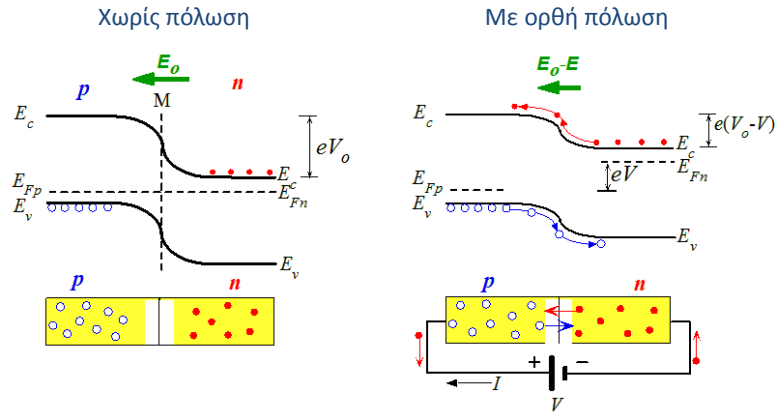
## Το εσωτερικό δυναμικό $V_0$ από το διάγραμμα ζωνών

$$eV_0 = -kT \ln \frac{n_{po}}{n_{no}} \Rightarrow$$

$$eV_0 = -kT \ln \frac{\frac{n_i^2}{N_a}}{N_d} \Rightarrow$$

$$V_0 = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

## Διάγραμμα ζωνών της επαφής p-n με ορθή πόλωση



Το επίπεδο Fermi δεν είναι χωρικά συνεχές.

## Το ορθό ρεύμα από το διάγραμμα ζωνών

### Χωρίς πόλωση

Η πιθανότητα ένα ηλεκτρόνιο να υπερπηδήσει το φράγμα του εσωτερικού δυναμικού είναι ανάλογη του  $e^{-\frac{eV_0}{kT}}$

Συνεπώς:

$$J_{diff}(0) = Be^{-\frac{eV_0}{kT}}$$

Το συνολικό ρεύμα είναι:

$$J(0) = J_{diff}(0) + J_{drift}(0) = 0 \Rightarrow$$

$$J_{drift}(0) = -J_{diff}(0) = -Be^{-\frac{eV_0}{kT}}$$

### Με ορθή πόλωση

Η πιθανότητα ένα ηλεκτρόνιο να υπερπηδήσει το φράγμα είναι ανάλογη του  $e^{-\frac{e(V_0-V)}{kT}}$

Συνεπώς το ρεύμα διάχυσης είναι:

$$J_{diff}(V) = Be^{-\frac{e(V_0-V)}{kT}}$$

Το ολικό ρεύμα είναι:

$$J(V) = J_{diff}(V) + J_{drift}(V)$$

Προσέγγιση:  $J_{drift}(V) \approx J_{drift}(0)$

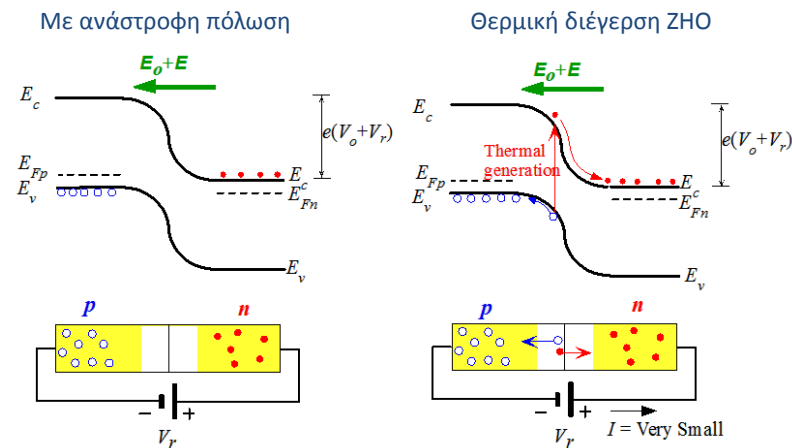
$$J(V) = Be^{-\frac{e(V_0-V)}{kT}} - Be^{-\frac{eV_0}{kT}} \Rightarrow$$

$$J(V) = Be^{-\frac{eV_0}{kT}} (e^{\frac{eV}{kT}} - 1)$$

$$J(V) = J_{so} (e^{\frac{eV}{kT}} - 1)$$

Όμοια για τις οπές.

## Διάγραμμα ζωνών της επαφής p-n με ανάστροφη πόλωση

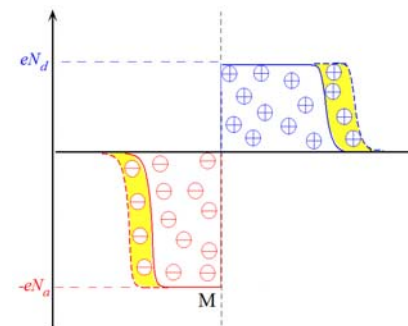


Πολύ μικρό ρεύμα διάχυσης  $J_{diff}$  ανάλογο του  $e^{-\frac{e(V_0+V_r)}{kT}}$

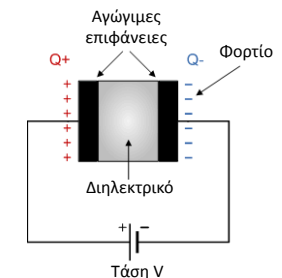
Μικρό ρεύμα ολίσθησης  $J_{drift}$  από θερμική διέγερση ΖΗΟ στην περιοχή απογύμνωσης.

## Χωρητικότητα της περιοχής απογύμνωσης

Επειδή η περιοχή απογύμνωσης έχει φορτία, λειτουργεί ως πυκνωτής.



Πυκνωτής



Η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι:

$$C = \frac{Q}{V}$$

και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά  $A$ : εμβαδόν επιφανειών,  $d$ : απόσταση επιφανειών:

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

## Χωρητικότητα της περιοχής απογύμνωσης

Θέλουμε να βρούμε τη χωρητικότητα σε δυναμικές συνθήκες, δηλαδή όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι συνάρτηση του χρόνου.

Ορίζουμε

$$C_{dep} = \left| \frac{dQ}{dV} \right|$$

Όμως το φορτίο είναι

$$Q = eN_d W_n A$$

και

$$W_n = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_0 - V)}{e} \frac{N_a}{N_d(N_a + N_d)}}$$

Τελικά:

$$Q = eN_d A \sqrt{\frac{2\epsilon(V_0 - V)}{e} \frac{N_a}{N_d(N_a + N_d)}} \Rightarrow$$

$$Q = A \sqrt{2\epsilon e(V_0 - V) \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}$$

Παραγωγίζουμε:

$$\frac{dQ}{dV} = -\frac{A}{2\sqrt{V_0 - V}} \sqrt{2\epsilon e \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}} \Rightarrow$$

$$\frac{dQ}{dV} = -\frac{A}{\sqrt{V_0 - V}} \sqrt{\frac{\epsilon e}{2} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}$$

## Χωρητικότητα της περιοχής απογύμνωσης

$$C_{dep} = \frac{A}{\sqrt{V_0 - V}} \sqrt{\frac{\epsilon e}{2} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}$$

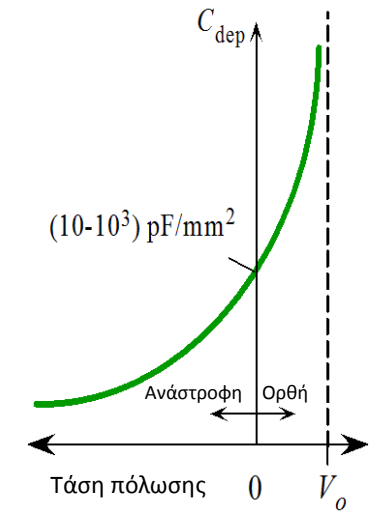
Μπορούμε να επιβεβαιώσουμε ότι

$$C_{dep} = \epsilon \frac{A}{W}$$

όπως και στην περίπτωση του απλού πυκνωτή.

Εφαρμογή σε διόδους μεταβλητής χωρητικότητας (varicaps) σε κυκλώματα συντονισμού.

Η διόδος πολώνεται ανάστροφα ώστε να μην άγει και εφαρμόζεται κατάλληλη ανάστροφη τάση η οποία ρυθμίζει τη χωρητικότητα.



## Παράδειγμα #6 – Χωρητικότητα της περιοχής απογύμνωσης

Μια επαφή p-n πυριτίου έχει διατομή  $A=1\text{mm}^2$ , συγκέντρωση αποδεκτών  $N_a=5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ , συγκέντρωση δοτών  $N_d=10^{16}/\text{cm}^3$  και πολώνεται ορθά έτσι ώστε να διαρρέεται από ρεύμα  $5\text{mA}$ . Ο μέσος χρόνος ζωής των οπών την περιοχή n είναι  $417\text{ns}$ , ενώ των ηλεκτρονίων στην περιοχή p είναι  $5\text{ns}$ . Ποιά είναι η χωρητικότητα της περιοχής απογύμνωσης της διόδου ;

Πρόκειται για την ίδια διόδο που είχαμε δει στο παράδειγμα #5

Η χωρητικότητα δίνεται από:

$$C_{dep} = \frac{A}{\sqrt{V_0 - V}} \sqrt{\frac{\epsilon e}{2} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}$$

Πρέπει να βρούμε την τάση πόλωσης. Θα χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση Shockley:

$$J = J_{so} e^{\frac{eV}{kT}} \Rightarrow$$

$$\frac{J}{J_{so}} = e^{\frac{eV}{kT}} \Rightarrow$$

$$\ln \frac{J}{J_{so}} = \frac{eV}{kT} \Rightarrow$$

$$V = \frac{kT}{e} \ln \frac{J}{J_{so}}$$

Για τη διόδο αυτή είχαμε βρει ότι

$$J_{so} = 8.37 \times 10^{-12} \frac{A}{\text{cm}^2}$$

$$V_0 = 0.877V$$

## Παράδειγμα #6 - Χωρητικότητα της περιοχής απογύμνωσης

Για να υπολογίσουμε την πυκνότητα ρεύματος  $J$  γράφουμε

$$J = \frac{I}{A} \Rightarrow$$

$$J = \frac{5 \times 10^{-3} A}{0.01 \text{cm}^2} \Rightarrow$$

$$J = 0.5 \frac{A}{\text{cm}^2}$$

Μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε την τάση πόλωσης:

$$V = \frac{kT}{e} \ln \frac{J}{J_{so}}$$

Χρειαζόμαστε:

$$kT/e = 0.0259V$$

$$V = 0.0259V \ln \frac{0.5 \frac{A}{\text{cm}^2}}{8.37 \times 10^{-12} \frac{A}{\text{cm}^2}} \Rightarrow$$

$$V = 0.643V$$

(μικρότερη του  $V_0$ )

Η χωρητικότητα είναι:

$$C_{dep} = \frac{A}{\sqrt{V_0 - V}} \sqrt{\frac{\epsilon e}{2} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}$$

Επειδή  $N_a \gg N_d$  μπορούμε να γράψουμε

$$C_{dep} = \frac{A}{\sqrt{V_0 - V}} \sqrt{\frac{\epsilon e}{2} N_d}$$

## Παράδειγμα #6 - Χωρητικότητα της περιοχής απογύμνωσης

Χρειαζόμαστε

$$e = 1.6 \times 10^{-19} C$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 = 11.9 \times \left( 8.85 \times 10^{-12} \frac{F}{m} \right) = 1.05 \times 10^{-10} \frac{F}{m}$$

Αντικαθιστούμε για τη χωρητικότητα:

$$C_{dep} = 0.01 cm^2 \sqrt{\frac{\left( 1.05 \times 10^{-10} \frac{F}{m} \right) (1.6 \times 10^{-19} C)}{2 \times (0.877V - 0.643V)}} 10^{16} cm^{-3} =$$

$$0.01 \sqrt{3.59 \times 10^{-13} \frac{F C cm^{-3}}{mV}} cm^4 =$$

$$0.01 \sqrt{3.59 \times 10^{-13} F^2 \frac{cm}{m}} =$$

$$0.01 \sqrt{3.59 \times 10^{-13} F^2 \times 0.01} =$$

$$599 \times 10^{-12} F = 599 pF$$

## Παράδειγμα #7

Συμμετρική δίοδος πυριτίου έχει συγκέντρωση αποδεκτών  $10^{17} cm^{-3}$  και διατομή  $1 mm^2$ . Ποια είναι η ανάστροφη τάση που πρέπει να εφαρμοστεί έτσι ώστε η περιοχή απογύμνωσης να εμφανίζει χωρητικότητα  $165 pF$ ;

Η χωρητικότητα δίνεται από:

$$C_{dep} = \sqrt{\frac{A^2 \varepsilon e}{2(V_0 - V)} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}} \Rightarrow$$

$$V_0 - V = \frac{\varepsilon e}{2} \frac{A^2}{C_{dep}^2} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \Rightarrow$$

$$V = V_0 - \frac{\varepsilon e}{2} \frac{A^2}{C_{dep}^2} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} =$$

$$V_0 - \frac{\varepsilon e}{2} \frac{A^2}{C_{dep}^2} \frac{N_a N_a}{N_a + N_a} =$$

$$V_0 - \frac{\varepsilon e}{4} \frac{A^2}{C_{dep}^2} N_a$$

Το εσωτερικό δυναμικό είναι:

$$V_0 = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} =$$

$$\frac{kT}{e} \ln \frac{N_a^2}{n_i^2} =$$

$$2 \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a}{n_i}$$

Χρειαζόμαστε:

$$e = 1.6 \times 10^{-19} C$$

$$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$$

$$\varepsilon_r = 11.9$$

$$n_i = 10^{10} / cm^3$$

$$kT/e = 0.0259V$$

## Παράδειγμα #7

Βρίσκουμε πρώτα το εσωτερικό δυναμικό

$$V_0 = 2 \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a}{n_i} =$$

$$2(0.0259V) \ln \frac{10^{17} cm^{-3}}{10^{10} cm^{-3}} =$$

$$0.835V$$

Μετατρέπουμε σε μονάδες SI

$$A = 1 mm^2 = 10^{-6} m^2$$

$$N_a = 10^{17} cm^{-3} = 10^{17} \times 10^6 m^{-3} = 10^{23} m^{-3}$$

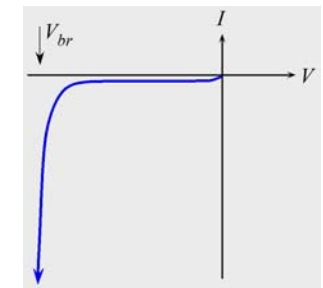
$$V = V_0 - \frac{\varepsilon e}{4} \frac{A^2}{C_{dep}^2} N_a =$$

$$0.835V - \frac{\left( 11.9 \times 8.85 \times 10^{-12} \frac{F}{m} \right) (1.6 \times 10^{-19} C)}{4} \frac{(10^{-6} m^2)^2}{(165 \times 10^{-12} F)^2} 10^{23} m^{-3} =$$

$$-14.6V \quad (\text{ανάστροφη πόλωση})$$

## Κατάρρευση στην ανάστροφη πόλωση

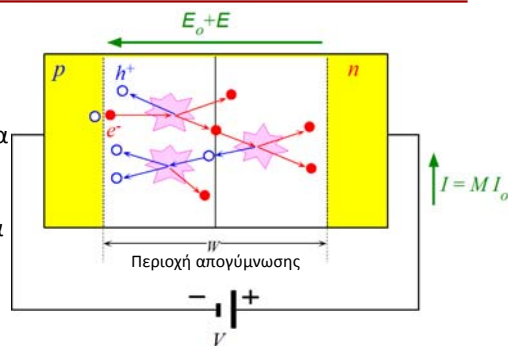
- Σε μια δίοδο η ανάστροφη τάση δεν μπορεί να αυξηθεί χωρίς όριο.
- Μετά από ένα όριο η επαφή p-n καταρρέει επιτρέποντας μεγάλο ανάστροφο ρεύμα.
- Αυξάνεται η ισχύς που καταναλώνεται.
- Αυξάνεται η θερμοκρασία.
- Επιπλέον αύξηση του ρεύματος.



- Αν λόγω της θερμοκρασίας δεν καταστραφεί η διάταξη (πχ. λιώσιμο επαφών) τότε αυτή μπορεί να λειτουργήσει σε συνθήκες κατάρρευσης.
- Υπάρχουν δύο μηχανισμοί κατάρρευσης:
  - Φαινόμενο χιονοστιβάδας
  - Φαινόμενο Zener

## Κατάρρευση – Φαινόμενο χιονοστιβάδας

- Καθώς η ανάστροφη πόλωση μεγαλώνει, το ηλεκτρικό πεδίο αυξάνεται.
- Λόγω του ηλεκτρικού πεδίου ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να επιταχυνθεί τόσο ώστε να συγκρουστεί με ένα άτομο Si, να σπάσει ένα δεσμό Si-Si και να αποκολλήσει ένα ηλεκτρόνιο (ιονισμός λόγω κρούσης).
- Έχουμε διέγερση ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας.
- Το αρχικό ηλεκτρόνιο χάνει ενέργεια  $E_g$  (τουλάχιστον).
- Συνεχίζει να επιταχύνει εξαιτίας του πεδίου (πιθανός και άλλος ιονισμός).
- Το ζεύγος οπής/ηλεκτρονίου που δημιουργήθηκε μπορεί να επιταχυνθεί από το πεδίο και να δημιουργήσει και άλλα ζεύγη οπής/ηλεκτρονίου.
- Ένας αρχικός φορέας μπορεί να δημιουργήσει πολλούς φορείς.



## Κατάρρευση – Φαινόμενο χιονοστιβάδας

Το ρεύμα δίνεται από:

$$I = MI_0$$

όπου

$I_0$  Ρεύμα πριν την κατάρρευση

$M$  Πολλαπλασιαστικός παράγοντας

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_r}{V_{br}}\right)^n}$$

$V_{br}$  Η ανάστροφη τάση κατάρρευσης. Εξαρτάται από τη νόθευση.

$n$  Τυπικές τιμές: 3 ... 5

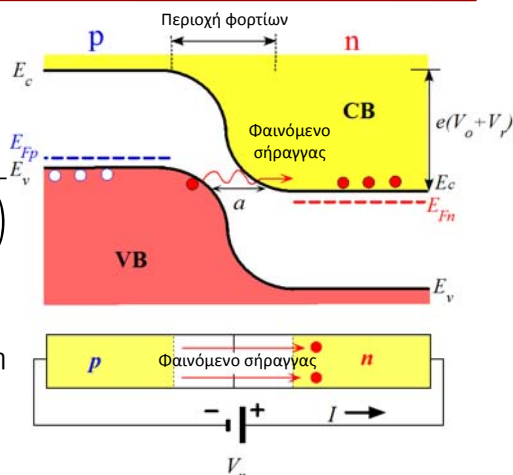
## Κατάρρευση – Φαινόμενο Zener

- Επαφές p-n με μεγάλες συγκεντρώσεις νόθευσης έχουν μικρότερη περιοχή απογύμνωσης.

- Υπενθύμιση:

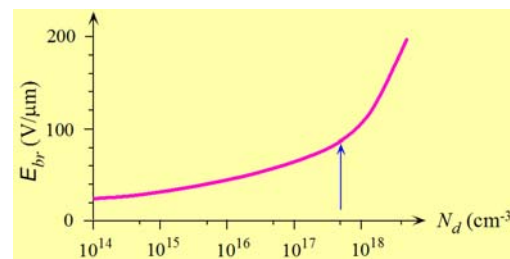
$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_0 + V_r)}{e} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)}$$

- Το ηλεκτρικό πεδίο είναι ισχυρότερο.
- Στο διάγραμμα ζωνών μπορεί η  $E_c$  στην περιοχή n να είναι χαμηλότερα από την  $E_v$  στην περιοχή p.
- Ηλεκτρόνια στην κορυφή της ΖΣ είναι σε ίδια ενέργειά με άδειες καταστάσεις της ΖΑ. Επειδή η απόσταση  $a$  μικραίνει μπορούν να μεταβούν με το φαινόμενο σήραγγας από τη ΖΣ της περιοχής p στη ΖΑ της περιοχής n.



## Κατάρρευση – Φαινόμενο Zener

- Επειδή υπάρχουν πολλά ηλεκτρόνια στη ΖΣ και πολλές κενές καταστάσεις στη ΖΑ το ρεύμα θα είναι μεγάλο.
- Διαισθητική εξήγηση:  
Το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή απογύμνωσης αποσπά ηλεκτρόνια από τους δεσμούς Si-Si τα οποία στη συνέχεια διατίθενται ως φορείς αγωγιμότητας.



Εξάρτηση του ηλεκτρικού πεδίου  $E_{br}$  από τη συγκέντρωση σε επαφή p-n.

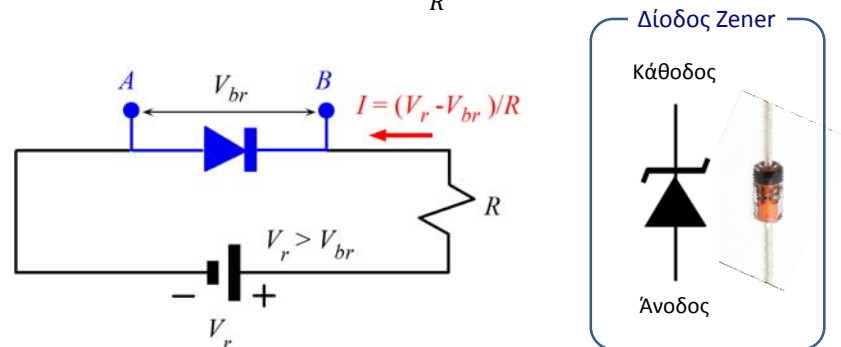
Σε χαμηλές συγκεντρώσεις ενεργοποιείται ο μηχανισμός χιονοστιβάδας.  
Σε υψηλές συγκεντρώσεις υπερσχύει το φαινόμενο Zener.



## Λειτουργία σε συνθήκες κατάρρευσης

- Εάν περιορίσουμε το ανάστροφο ρεύμα (μέσω αντίστασης), η διόδος μπορεί να λειτουργήσει σε συνθήκες κατάρρευσης.
- Όσο ισχύει  $V_r > V_{br}$  η διόδος διατηρεί την τάση στα άκρα της ίση με  $V_{br}$
- Το ανάστροφο ρεύμα θα είναι:

$$I = \frac{V_r - V_{br}}{R}$$



## Παράδειγμα #8 – Κατάρρευση διόδου στην ανάστροφη πόλωση

- Μια διόδος p-n πυριτίου πολώνεται ανάστροφα με τάση  $V_r$ .
- Δείξτε ότι η τάση κατάρρευσης  $V_{br}$  ( $\gg V_0$ ) και η αντίστοιχη μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E_{br}$  συνδέονται με τη σχέση:  $V_{br} = \frac{\epsilon E_{br}^2}{2eN_d}$
  - Η διόδος έχει συγκέντρωση αποδεκτών βορίου  $10^{19} \text{cm}^{-3}$  και συγκέντρωση δοτών φωσφόρου  $10^{16} \text{cm}^{-3}$ . Ποιά είναι η τάση κατάρρευσης της διόδου λόγω του φαινομένου χιονοστιβάδας;
  - Ποιά είναι η τάση κατάρρευσης αν η συγκέντρωση φωσφόρου αυξηθεί σε  $10^{17} \text{cm}^{-3}$ ;

## Παράδειγμα #8.a – Σχέση μεταξύ $E_{br}$ και $V_{br}$

- a. Δείξτε ότι η τάση κατάρρευσης  $V_{br}$  ( $\gg V_0$ ) και η αντίστοιχη μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου  $E_{br}$  συνδέονται με τη σχέση:  $V_{br} = \frac{\epsilon E_{br}^2}{2eN_d}$

Επαφή p-n χωρίς πόλωση  
Η μέγιστη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου δίνεται από:

$$E_0 = -\sqrt{\frac{2V_0 e}{\epsilon} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}$$

Επαφή p-n με ανάστροφη πόλωση  
Ισχύει ο ίδιος τύπος, όμως αντί  $V_0$  βάζουμε  $V_0 + V_r$

Για την ανάστροφη πόλωση ισχύει:

$$E_0 = -\sqrt{\frac{2(V_0 + V_r) e}{\epsilon} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}$$

Για την τάση κατάρρευσης  $V_{br}$  η σχέση γράφεται:

$$E_{br} = -\sqrt{\frac{2(V_0 + V_{br}) e}{\epsilon} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}$$

Επειδή  $V_{br} \gg V_0$

$$E_{br} = -\sqrt{\frac{2V_{br} e}{\epsilon} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}$$

## Παράδειγμα #8.a – Σχέση μεταξύ $E_{br}$ και $V_{br}$

Επειδή η διόδος είναι p-n ισχύει ότι:

$$N_a \gg N_d$$

$$E_{br} = -\sqrt{\frac{2V_{br} e}{\epsilon} N_d} \Rightarrow$$

$$V_{br} = \frac{\epsilon E_{br}^2}{2eN_d}$$



## Παράδειγμα #8.b – Τάση κατάρρευσης

b. Η διόδος έχει συγκέντρωση αποδεκτών βορίου  $10^{19}\text{cm}^{-3}$  και συγκέντρωση δοτών φωσφόρου  $10^{16}\text{cm}^{-3}$ . Ποια είναι η τάση κατάρρευσης της διόδου λόγω του φαινομένου χιονοστιβάδας ;

Θα χρησιμοποιήσουμε τον τύπο

$$V_{br} = \frac{\varepsilon E_{br}^2}{2eN_d}$$

Χρειαζόμαστε όμως το  $E_{br}$

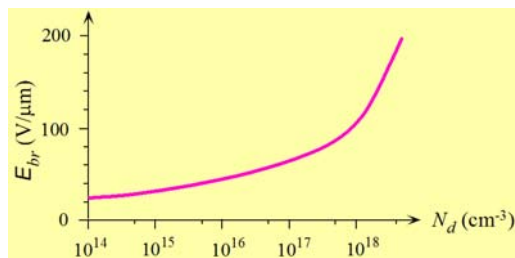
Για  $N_d=10^{16}\text{cm}^{-3}$

βρίσκουμε  $E_{br}=40\text{V}/\mu\text{m}$

Χρειαζόμαστε

$$e = 1.6 \times 10^{-19}\text{C}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 = 11.9 \times 8.85 \times 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} = 1.05 \times 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$



## Παράδειγμα #8.b – Τάση κατάρρευσης

Γράφουμε τα  $E_{br}$  και  $N_d$  σε μονάδες του διεθνούς συστήματος:

$$E_{br} = 40 \frac{\text{V}}{\mu\text{m}} = 40 \frac{\text{V}}{10^{-6}\text{m}} = 4 \times 10^7 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

$$N_d = 10^{16}\text{cm}^{-3} = 10^{16}(10^{-2}\text{m})^{-3} = 10^{22}\text{m}^{-3}$$

Αντικαθιστούμε στον τύπο:

$$V_{br} = \frac{\varepsilon E_{br}^2}{2eN_d} =$$

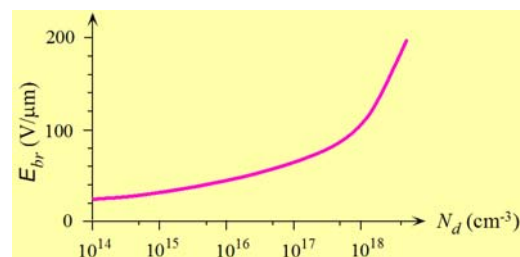
$$\frac{(1.05 \times 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}}) (4 \times 10^7 \frac{\text{V}}{\text{m}})^2}{2(1.6 \times 10^{-19}\text{C})(10^{22}\text{m}^{-3})} =$$

$$52.5 \frac{\text{FV}^2}{\text{C}} =$$

$$52.5\text{V}$$

## Παράδειγμα #8.c – Τάση κατάρρευσης

c. Ποια είναι η τάση κατάρρευσης αν η συγκέντρωση φωσφόρου αυξηθεί σε  $10^{17}\text{cm}^{-3}$  ;



Για  $N_d=10^{17}\text{cm}^{-3}$

βρίσκουμε  $E_{br}=60\text{V}/\mu\text{m}$

## Παράδειγμα #8.c – Τάση κατάρρευσης

Γράφουμε τα  $E_{br}$  και  $N_d$  σε μονάδες SI

$$E_{br} = 60 \frac{\text{V}}{\mu\text{m}} = 60 \frac{\text{V}}{10^{-6}\text{m}} = 6 \times 10^7 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

$$N_d = 10^{17}\text{cm}^{-3} = 10^{16}(10^{-2}\text{m})^{-3} = 10^{23}\text{m}^{-3}$$

Αντικαθιστούμε στον τύπο:

$$V_{br} = \frac{\varepsilon E_{br}^2}{2eN_d} =$$

$$\frac{(1.05 \times 10^{-10} \frac{\text{F}}{\text{m}}) (6 \times 10^7 \frac{\text{V}}{\text{m}})^2}{2(1.6 \times 10^{-19}\text{C})(10^{23}\text{m}^{-3})} =$$

$$11.8 \frac{\text{FV}^2}{\text{C}} =$$

$$11.8\text{V}$$

## Σύνοψη #1

Νόμος της επαφής p-n

$$p_n(0) = p_{no} e^{\frac{eV}{kT}}$$

$$n_p(0) = n_{po} e^{\frac{eV}{kT}}$$

Εξίσωση συνέχειας σε σταθερή κατάσταση

$$\frac{d^2 \Delta p_n(x)}{dx^2} = \frac{\Delta p_n(x)}{L_n^2}$$

Λύση της εξίσωσης συνέχειας σε σταθερή κατάσταση

$$\Delta p_n(x) = \Delta p_n(0) e^{-\frac{x}{L_n}}$$

Εξίσωση Shockley για την ιδανική δίοδο

$$J = J_{so} \left( e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right)$$

Πυκνότητα ανάστροφου ρεύματος κορεσμού

$$J_{so} = en_i^2 \left( \frac{D_n}{L_n N_a} + \frac{D_p}{L_p N_d} \right)$$

Ρεύμα λόγω επανασύνδεσης στην περιοχή απογύμνωσης

$$J_{recom} = J_{ro} e^{\frac{eV}{2kT}}$$

$$J_{ro} = \frac{1}{2} en_i \left( \frac{W_p}{\tau_e} + \frac{W_n}{\tau_h} \right)$$

## Σύνοψη #2

Ολικό ρεύμα σε ορθή πόλωση (υποθέτουμε  $\frac{eV}{kT} \gg 1$ ):

$$J = J_{so} e^{\frac{eV}{kT}} + J_{ro} e^{\frac{eV}{2kT}}$$

Ανάστροφο ρεύμα λόγω δημιουργίας ΖΗΟ στην περιοχή απογύμνωσης

$$J_{gen} = \frac{eWn_i}{\tau_g}$$

Ολικό ανάστροφο ρεύμα

$$J_{rev} = J_D + J_{gen}$$

Χωρητικότητα της περιοχής απογύμνωσης

$$C_{dep} = \frac{A}{\sqrt{V_0 - V}} \sqrt{\frac{\epsilon e}{2} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d}}$$

Φαινόμενο χιονοστιβάδας

$$I = MI_0$$

$I_0$  Ρεύμα πριν την κατάρρευση

$$M = \frac{1}{1 - \left( \frac{V_r}{V_{br}} \right)^n}$$

Τάση κατάρρευσης σε δίοδο p+n

$$V_{br} = \frac{\epsilon E_{br}^2}{2eN_d}$$