



Δίοδος Επαφής p-n στην Ισορροπία

- Κατασκευή μιας διόδου επαφής p-n
- Ηλεκτρικό πεδίο σε μια ένωση p-n
- Δυναμικό επαφής σε μια ένωση p-n
- Φορτίο χώρου σε μια ένωση p-n
- Διαστάσεις περιοχής φορτίου χώρου

Λευτέρης Καπετανάκης



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ

Ανοιξη 2010

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Στις διαφάνειες των διαλέξεων χρησιμοποιείται διδακτικό υλικό το οποίο έχει δανειστεί από διάφορα εκπαιδευτικά βιβλία και διαδικτυακές σελίδες. Ο εισηγητής δεν έχει καμιά αξίωση κατοχής του υλικού αυτού και το χρησιμοποιεί μόνο για λόγους διδασκαλίας εντός της τάξης. Οι εικόνες και οι πίνακες είναι κτήμα διαφόρων συγγραφέων και παρέχονται στον αντίστοιχο δικτυότόπό τους.

Εισαγωγή

□ Επαφή p-n

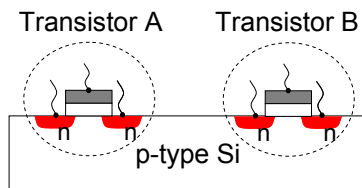
- p-περιοχή και n-περιοχή σε πολύ καλή επαφή

Γιατί αξίζει να μελετήσουμε την επαφή p-n ;

Επειδή, κατ'ουσία υπάρχει σε κάθε διάταξη ημιαγωγού!

Παράδειγμα: κάθετη τομή τρανζίστορ MOS

Μπορούμε να κατασκευάσουμε μεγάλα κυκλώματα αποτελούμενα από πολλά τρανζίστορ χωρίς να ανησυχούμε σχετικά με τη ροή του ρεύματος μεταξύ των διατάξεων. Οι επαφές p-n **απομονώνουν** τα τρανζίστορ επειδή υπάρχει πάντα τουλάχιστον μία **ανάστροφα-πολωμένη** επαφή p-n σε κάθε ενδεχόμενο μονοπάτι ρεύματος.

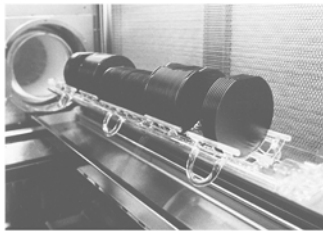


Η κατανόηση της επαφής p-n είναι απαραίτητη για την κατανόηση της λειτουργίας του τρανζίστορ

ΤΛ1001 – 2010

L7: Δίοδος Επαφής p-n στην ισορροπία

Κατασκευή μιας διόδου επαφής p-n



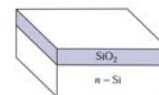
Δισκία πυριτίου φορτώνονται μέσα σε ειδικό φούρνο, για την ανάπτυξη στρώματος θερμικού διοξειδίου του πυριτίου SiO_2 στην επιφάνεια του δισκίου.

(α) Δισκίο Si n-τύπου.



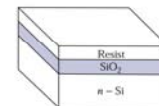
(α)

(β) Οξειδωμένο δισκίο Si.



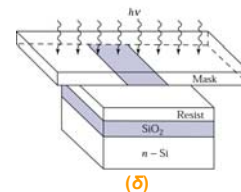
(β)

(γ) Επίστρωση φωτοευαίσθητου υλικού (Resist).



(γ)

(δ) Έκθεση Resist διαμέσου μάσκας.



(δ)

ΤΛ1001 – 2010

L7: Δίοδος Επαφής p-n στην ισορροπία

Κατασκευή μιας διόδου επαφής p-n

(α) Το δισκίο μετά την εμφάνιση.

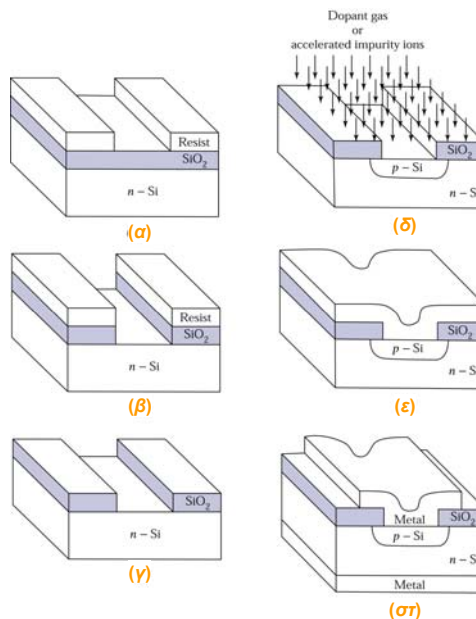
(β) Το δισκίο μετά την απομάκρυνση του SiO_2 .

(γ) Τελική μορφή δισκίου μετά την περάτωση της φωτολιθογραφικής διαδικασίας.

(δ) Η επαφή p-n σχηματίζεται με τη διαδικασία της εμφύτευσης ή της διάχυσης ατόμων νόθευσης

(ε) Το δισκίο μετά την επίστρωση μεταλλικού στρώματος.

(στ) Η επαφή p-n μετά τη γενική κατεργασία.

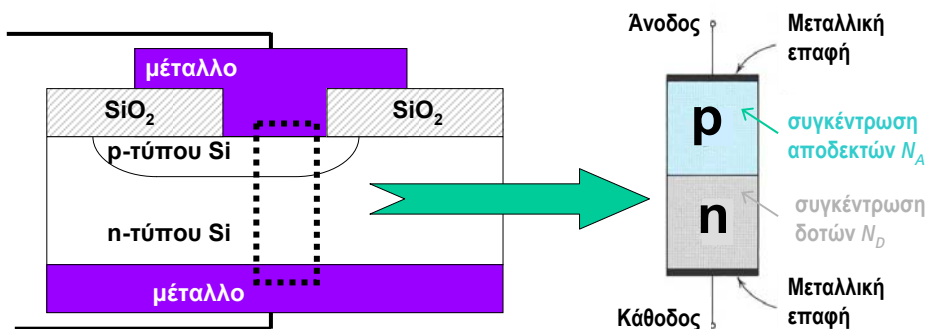


ΤΛ1001 – 2010

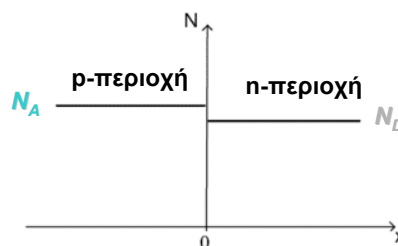
L7: Διόδος Επαφής p-n στην ισορροπία

Μελέτη της επαφής p-n στην ισορροπία

Θα εστιάσουμε στην εσωτερική περιοχή:



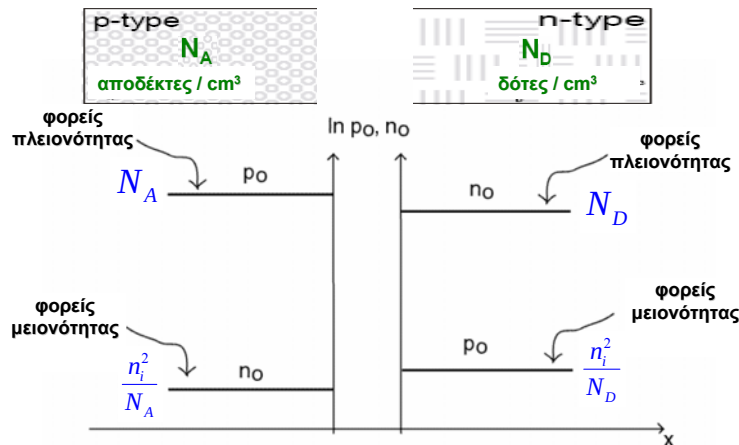
Για απλότητα, θα θεωρήσουμε ότι το προφίλ της συγκέντρωσης αλλάζει απότομα στην επαφή



Κατανομή προσμίξεων σε μια απότομη (abrupt) επαφή p-n

Ποια είναι η κατανομή της συγκέντρωσης φορέων στη θερμική ισορροπία;

Αρχικά, σκεφτείτε δύο ξεχωριστές περιοχές p & n:



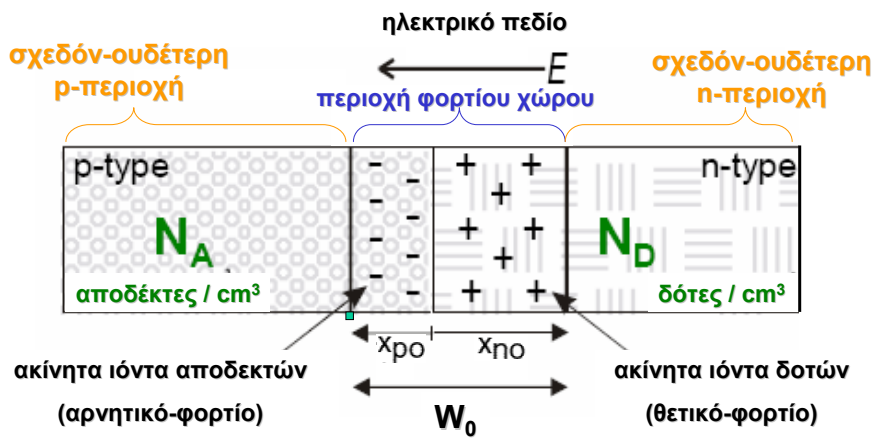
Τώρα ενώστε τις δύο πλευρές p & n
Τι θα συμβεί;

- Όταν δημιουργείται μια επαφή p-n, ευκίνητοι φορείς **διαχέονται** εξαιτίας της κλίσης των συγκεντρώσεων
 - Οπές διαχέονται από την **p πλευρά** στην n πλευρά, αφήνοντας πίσω **αρνητικά ακίνητα ιόντα αποδεκτών**
 - Ηλεκτρόνια διαχέονται από την **n πλευρά** στην p πλευρά, αφήνοντας πίσω **θετικά φορτισμένα ακίνητα ιόντα δοτών**

→ μία **περιοχή φορτίου** εξαιτίας των ακίνητων μη-αντισταθμισμένων ιονισμένων προσμίξεων δημιουργείται κοντά στη διεπιφάνεια των δύο διαφορετικών πλευρών νόθευσης (**στη μεταλλουργική ένωση**).

- Το φορτίο χώρου δημιουργεί ένα **ηλεκτρικό πεδίο** το οποίο αντιτίθεται στη διάχυση των φορέων.

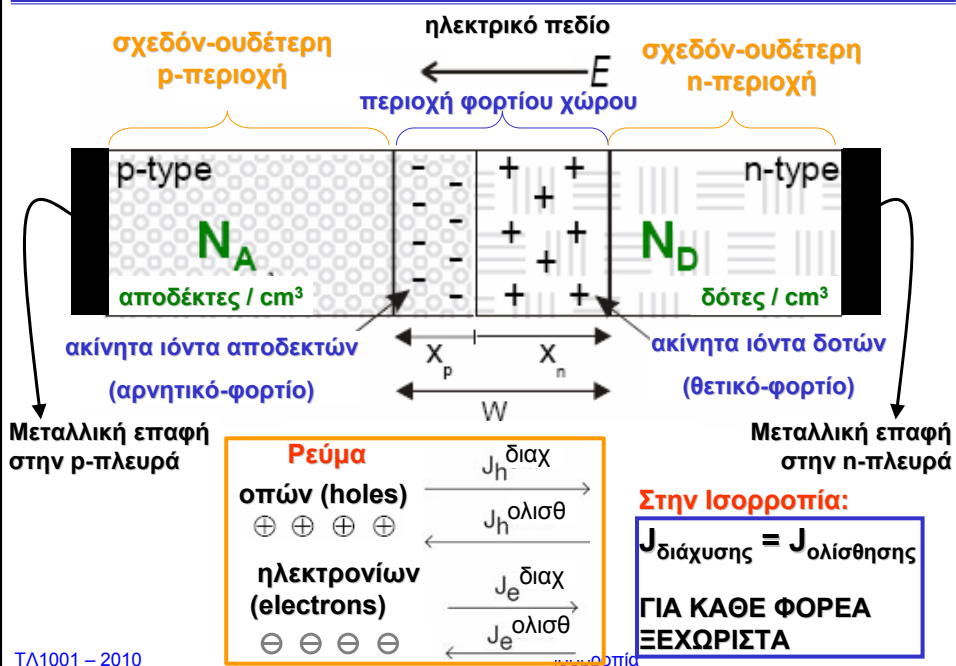
Απλοποιημένη δομή μιας επαφής p-n σε ΘΙ



Μπορούμε να χωρίσουμε τον ημιαγωγό σε τρεις περιοχές:

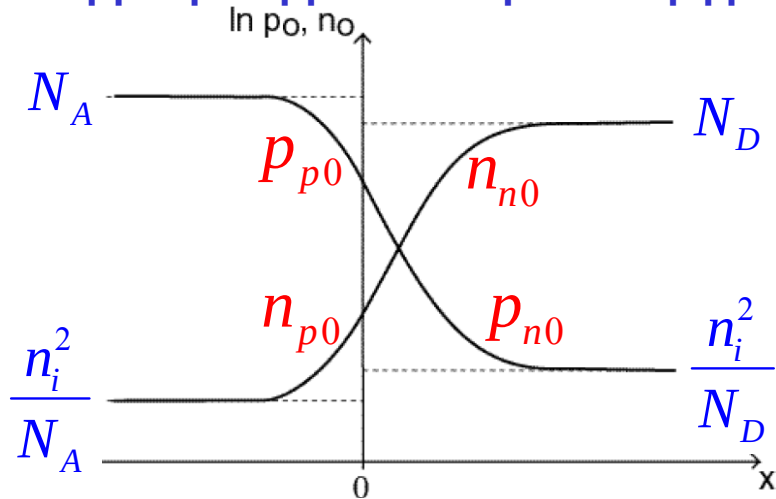
- Δύο σχεδόν-ουδέτερες περιοχές
- Μία περιοχή φορτίου χώρου

Ρεύματα Επαφής p-n σε Θερμική Ισορροπία



ΤΑ1001 – 2010

Προφίλ της συγκέντρωσης φορέων στη θερμική ισορροπία σε μια επαφή p-n



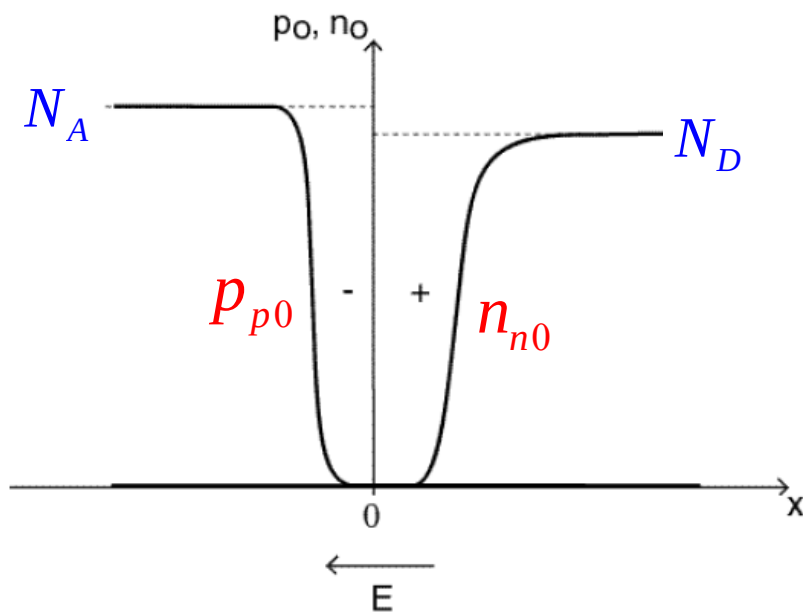
- Μακριά από τη μεταλλουργική επαφή:

δε συμβαίνει τίποτα

- Δύο **σχεδόν-ουδέτερες περιοχές**

ισορροπία

Προφίλ της συγκέντρωσης φορέων σε γραμμική κλίμακα

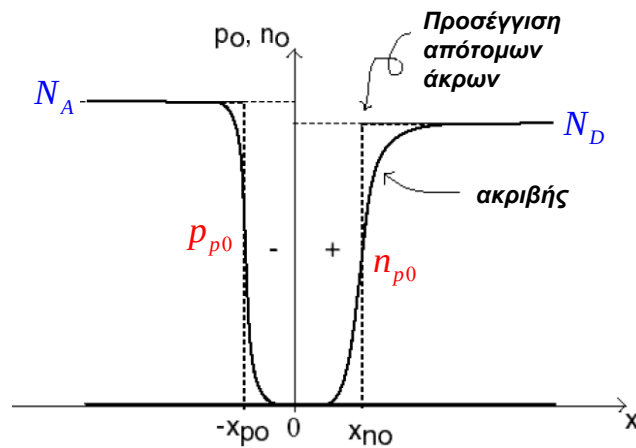


ΤΛ1001 – 2010

L7: Δίοδος Επαφής p-n στην ισορροπία

Προσέγγιση απότομων άκρων (The Depletion Approximation)

- Θεωρεί ότι οι σχεδόν-ουδέτερες περιοχές είναι εξ ολοκλήρου **ηλεκτρικά ουδέτερες**
- Θεωρεί ότι η περιοχή φορτίου χώρου είναι **απογυμνωμένη** από ευκινήτους φορείς
- **περιοχή απογυμνωμένης**
- Η μετάβαση ανάμεσα στις σχεδόν-ουδέτερες περιοχές και την περιοχή φορτίου χώρου είναι απότομη στα σημεία
- $-x_{p0}$ and x_{n0} (θα πρέπει να ξέρετε να τα υπολογίζετε)



ΤΛ1001 – 2010

L7: Δίοδος Επαφής p-n στην ισορροπία

Συγκέντρωση φορέων στην προσέγγιση απότομων άκρων

$$x < -x_{p0} : \quad p_{p0} \simeq N_A, \quad n_{p0} \simeq \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$-x_{p0} < x < 0 : \quad p_{p0}(x), \quad n_{p0}(x) \ll N_A$$

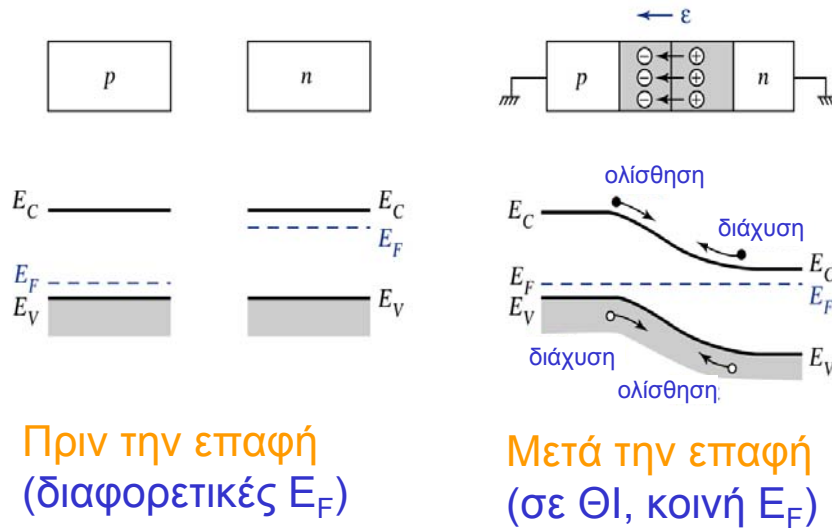
$$0 < x < x_{n0} : \quad n_{n0}(x), \quad p_{n0}(x) \ll N_D$$

$$x > x_{n0} : \quad n_{n0} \simeq N_D, \quad p_{n0} \simeq \frac{n_i^2}{N_D}$$

ΤΛ1001 – 2010

L7: Δίοδος Επαφής p-n στην ισορροπία

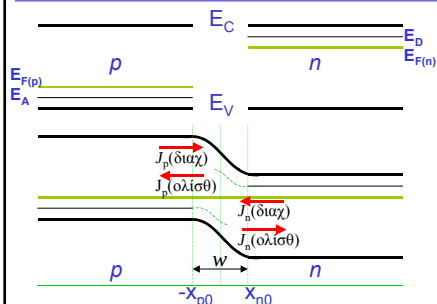
Ενεργειακό διάγραμμα επαφής p-n σε ΘΙ



ΤΛ1001 – 2010

L7: Δίοδος Επαφής p-n στην ισορροπία

Δυναμικό επαφής p-n σε ΘΙ



$$J_n(\text{ολίσθ}) + J_n(\text{διάχ}) = 0$$

$$J_p(\text{ολίσθ}) + J_p(\text{διάχ}) = 0 \Rightarrow$$

$$q \left[\mu_p p(x) E(x) - D_p \frac{dp(x)}{dx} \right] = 0$$

$$\Rightarrow \frac{\mu_p}{D_p} (E(x) dx) = \frac{dp(x)}{p(x)}$$

$$\text{σχ. Einstein: } \frac{\mu_p}{D_p} = \frac{q}{kT}$$

$$\Rightarrow -\frac{q}{kT} dV = \frac{dp(x)}{p(x)} \Rightarrow -\int_{V_p}^{V_n} dV = \frac{kT}{q} \int_{p_p}^{p_n} \frac{dp(x)}{p(x)} \Rightarrow V_n - V_p = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_{p0}}{p_{n0}} \right)$$

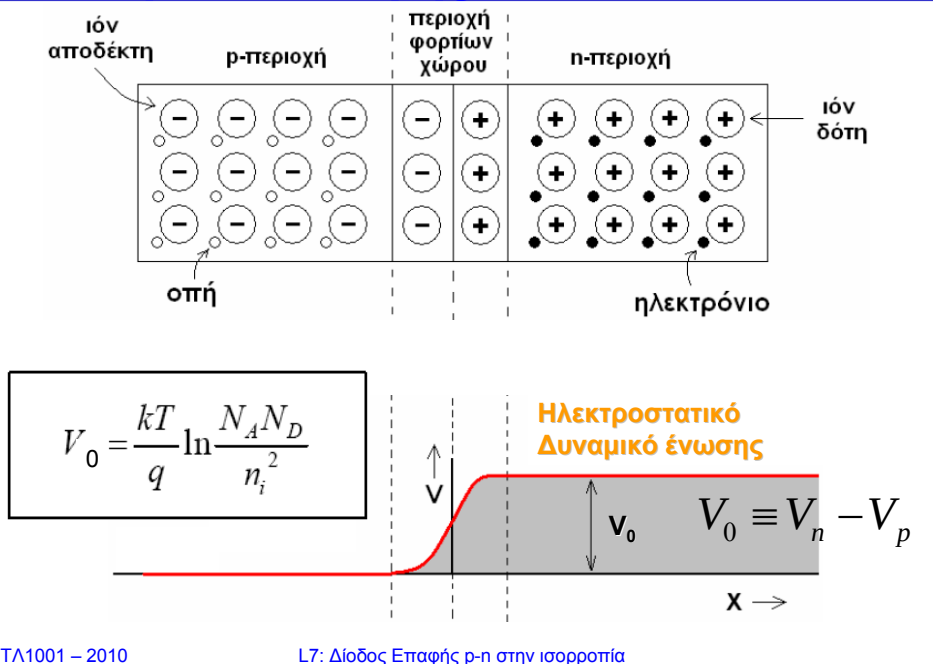
- α) Ρεύμα διάχυσης κατά μήκος της επαφής λόγω των $-dn/dx$ και $-dp/dx$
- β) Δημιουργία φορτίου χώρου από τις μη αντισταθμιζόμενες ιονισμένες προσμείξεις
- γ) Ανάπτυξη εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου λόγω φορτίου χώρου
- δ) Ρεύμα ολίσθησης λόγω του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου
- ε) Σε ΘΙ, αλληλοαναιρέση ρευμάτων διάχυσης και ολίσθησης

Συνθήκη υπολογισμού του δυναμικού επαφής p-n

ΤΛ1001 – 2010

L7: Δίοδος Επαφής p-n στην ισορροπία

Δυναμικό Επαφής



Δυναμικό επαφής p-n συναρτήσει των N_A και N_D

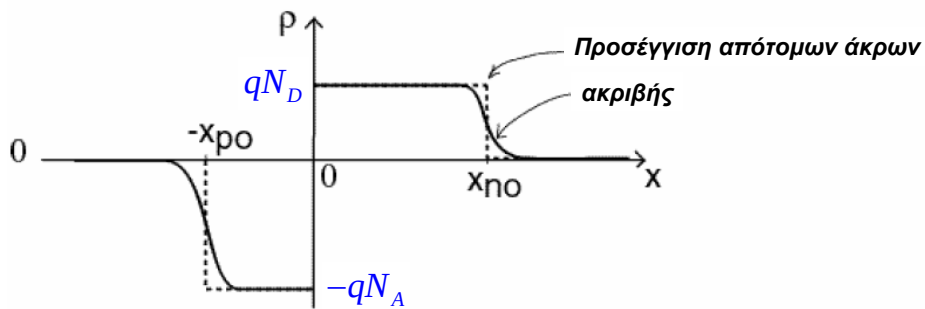
Έστω: προσμερίζεις πλευράς p: $N_A \approx N_A^- \approx p$
 προσμερίζεις πλευράς n: $N_D \approx N_D^+ \approx n$
 Λόγω θερμοδυναμικής Ισορροπίας:

$$\left. \begin{aligned} p_{p0} &\approx N_A, & p_{n0} &= \frac{n_i^2}{n_{n0}} \approx \frac{n_i^2}{N_D} \\ V_n - V_p &= \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_{p0}}{p_{n0}} \right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_n - V_p = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \equiv V_0 : \text{Δυναμικό Επαφής}$$

Επίσης, λόγω θερμοδυναμικής ισορροπίας, ισχύει ο νόμος δράσης των μαζών, σε κάθε περιοχή (p και n), οπότε :

$$p_{p0} n_{p0} = n_i^2 = n_{n0} p_{n0} \Rightarrow \frac{p_{p0}}{p_{n0}} = \frac{n_{n0}}{n_{p0}} = e^{qV_0/kT}$$

Κατανομή φορτίου χώρου επαφής p-n σε Θ1



$$\begin{aligned}\rho(x) &= 0 : & x < -x_{po} \\ &= -qN_A : & -x_{po} < x < 0 \\ &= qN_D : & 0 < x < x_{no} \\ &= 0 : & x > x_{no}\end{aligned}$$

ΤΛ1001 – 2C

Ηλεκτρικό πεδίο επαφής p-n σε Θ1

Εξίσωση Poisson :

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = \begin{cases} -\frac{qN_A}{\epsilon_s}, & -x_{po} < x < 0 \\ +\frac{qN_D}{\epsilon_s}, & 0 < x < x_{no} \end{cases}$$

Ολοκλήρωση της εξίσωσης Poisson: $E(x_2) - E(x_1) = \frac{1}{\epsilon_s} \int_{x_1}^{x_2} \rho(x) dx$

Λύση μηδενιζόμενη στα $x = -x_{po}$, $x = x_{no}$ και συνεχής στο $x=0$

$x < -x_{po}$: $E(x) = 0$

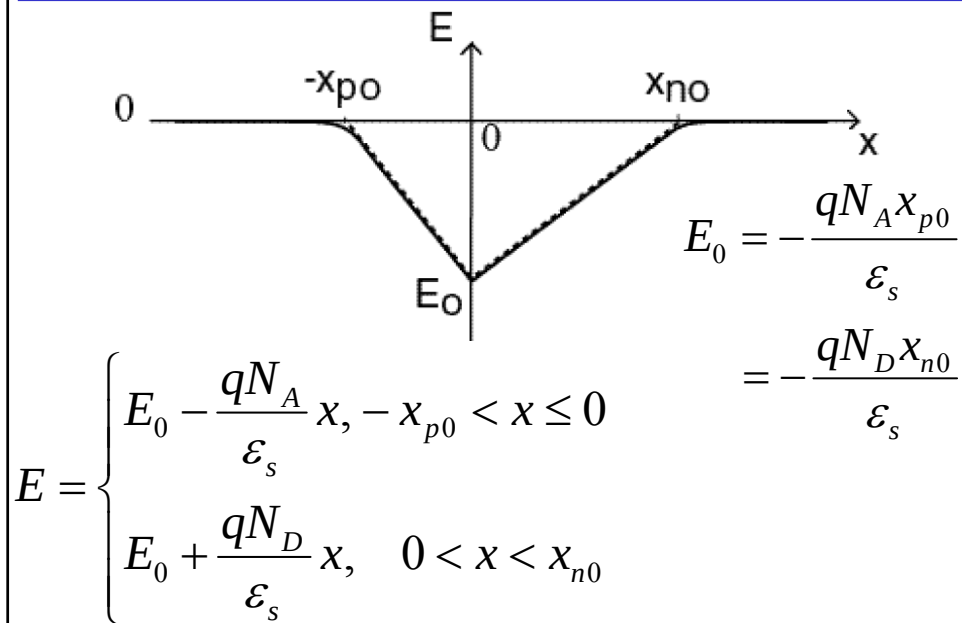
$-x_{po} < x < 0$: $E(x) - E(-x_{po}) = \frac{1}{\epsilon_s} \int_{-x_{po}}^x -qN_A dx'$

$$= \left[-\frac{qN_A}{\epsilon_s} x' \right]_{-x_{po}}^x = -\frac{qN_A}{\epsilon_s} (x + x_{po})$$

$0 < x < x_{no}$: $E(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_s} (x - x_{no})$

$x > x_{no}$: $E(x) = 0$

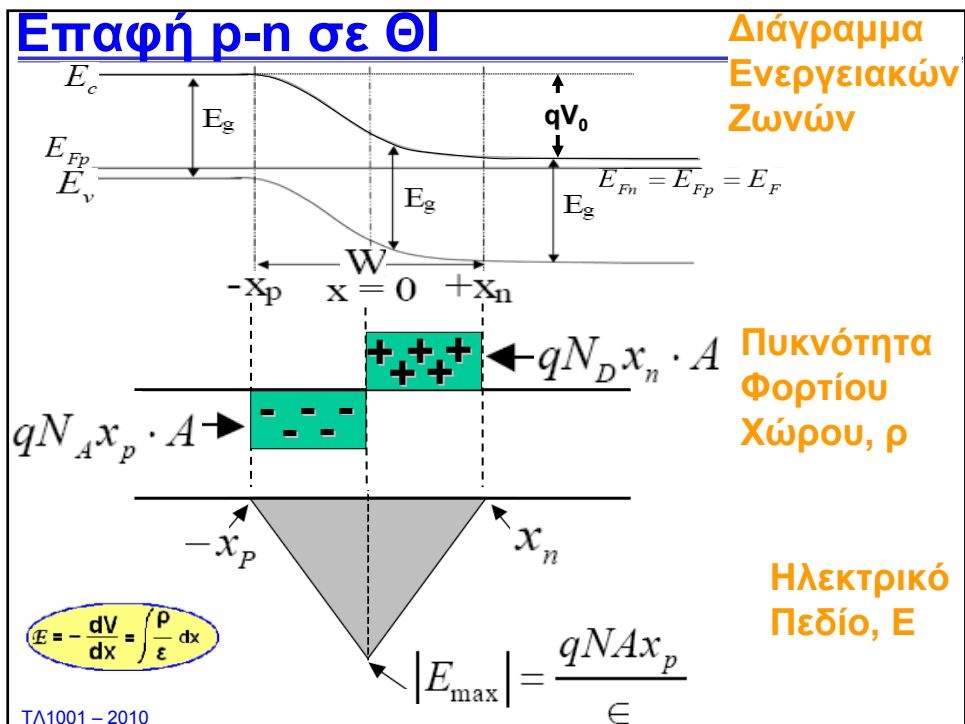
Ηλεκτρικό πεδίο σε ΘΙ



ΤΛ1001 – 2010

L7: Δίοδος Επαφής p-n στην ισορροπία

Επαφή p-n σε ΘΙ



ΤΛ1001 – 2010

Συνθήκη ουδετερότητας :

$$qN_A x_p \cdot A = qN_D x_n \cdot A \quad \text{ή} \quad \boxed{N_A x_p = N_D x_n}$$

$$\begin{array}{ccc} \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ qN_D & x_n & A = \text{Coulombs} \\ \text{Coulombs cm}^{-3} & \text{cm} & \text{cm}^2 \end{array}$$

$$qN_A \cdot x_p \cdot A = \text{Coulombs}$$

ΤΛ1001 – 2010

L7: Δίοδος Επαφής p-n στην ισορροπία

Υπολογισμός των x_n και x_p

$$V = - \int E dx \quad \longrightarrow \quad V_0 = \frac{1}{2} \cdot (x_n + x_p) \cdot E_{\max}$$

ρ-πλευρά	n-πλευρά
$V_0 = \frac{1}{2} (x_n + x_p) \frac{qN_A}{\epsilon} x_p$	$V_0 = \frac{1}{2} (x_n + x_p) \frac{qN_D}{\epsilon} x_n$
Αντικαθιστώντας για x_n ή $V_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{N_A + N_D}{N_D} x_p \right) \frac{qN_A}{\epsilon} x_p$	$V_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{N_D + N_D}{N_A} x_n \right) \frac{qN_D}{\epsilon} x_n$
ή $\frac{2\epsilon}{qN_A} V_0 = \left(\frac{N_A + N_D}{N_D} \right) x_p^2$	$\frac{2\epsilon}{qN_D} V_0 = \left(\frac{N_A + N_D}{N_A} \right) x_n^2$
Παρατήρηση: το $ E_{\max} $ υπολογίζεται σαν $\frac{qN_A}{\epsilon} x_p$ για την ρ-πλευρά και $\frac{qN_D}{\epsilon} x_n$ για την n-πλευρά	
$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \cdot \frac{N_D}{N_A} \cdot \frac{1}{(N_A + N_D)}} \cdot V_0$	$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \cdot \frac{N_A}{N_D} \cdot \frac{1}{(N_A + N_D)}} \cdot V_0$

ΤΛ1001 – 2010

L7: Δίοδος Επαφής p-n στην ισορροπία

Υπολογισμός του W

$$\begin{aligned}
 W &= x_n + x_p \\
 &= \sqrt{\frac{2\epsilon}{q}} \cdot V_0 \cdot \left[\frac{\sqrt{N_D}}{\sqrt{N_A} \cdot \sqrt{N_A + N_D}} + \frac{\sqrt{N_A}}{\sqrt{N_D} \cdot \sqrt{N_A + N_D}} \right] \\
 &= \sqrt{\frac{2\epsilon}{q}} \cdot V_0 \cdot \left[\frac{N_A + N_D}{\sqrt{N_A N_D} \cdot \sqrt{N_A + N_D}} \right] \\
 W &= \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}} \cdot V_0
 \end{aligned}$$

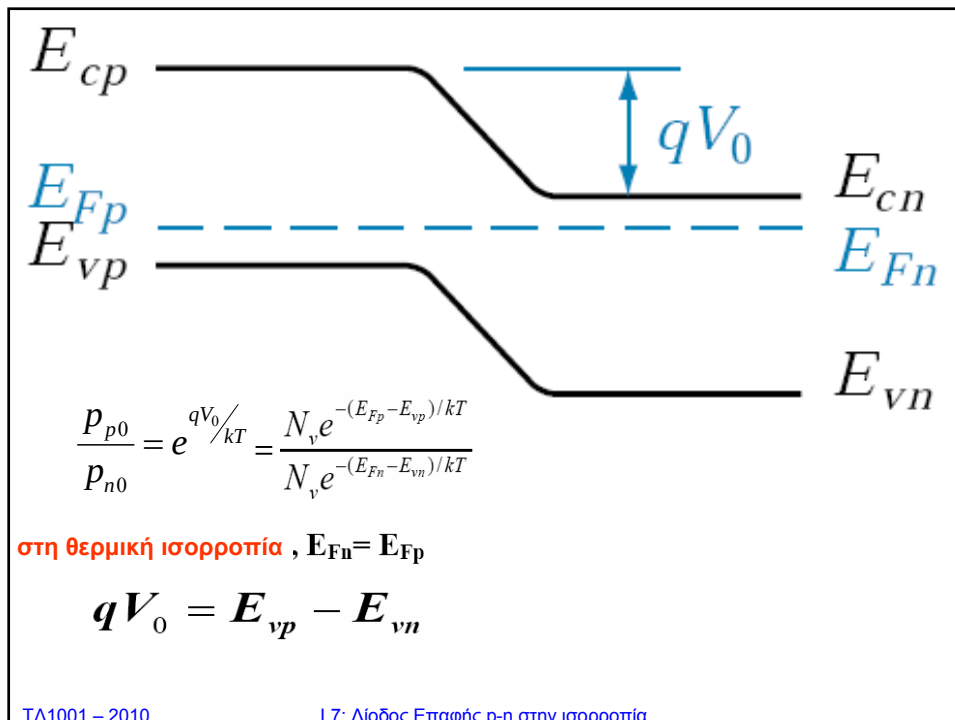
ΣΤΗΝ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ

$$W(0) = \sqrt{\frac{2\epsilon}{q} \cdot \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \cdot V_0}$$

**ΣΗΜΑΝΤΙΚΗ
ΣΧΕΣΗ**

ΤΛ1001 – 2010

L7: Δίοδος Επαφής p-n στην ισορροπία



ΤΛ1001 – 2010

L7: Δίοδος Επαφής p-n στην ισορροπία

Τρεις ειδικές περιπτώσεις

- Συμμετρική επαφή: $N_A = N_D$

$$x_{p0} = x_{n0}$$

- Ασύμμετρη επαφή: πχ, $N_A > N_D$

$$x_{p0} < x_{n0}$$

- Ισχυρά ασύμμετρη επαφή: πχ, $N_A \gg N_D$

$$x_{p0} \ll x_{n0} \approx w_0 \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_0}{qN_D}}$$

ΤΛ1001 – 2010

L7: Δίοδος Επαφής p-n στην ισορροπία

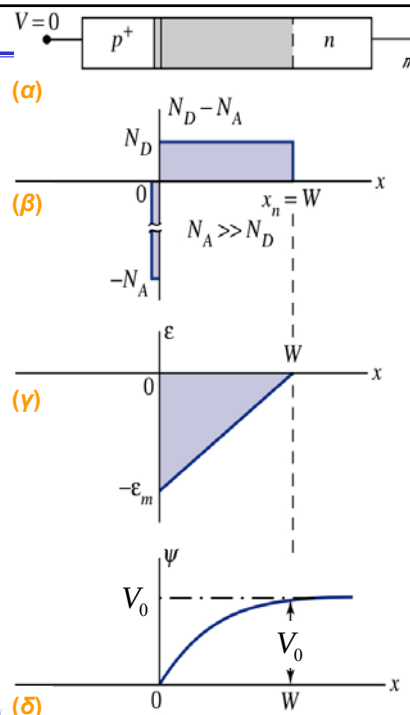
Επαφή p⁺-n

(α) Μονόπλευρη απότομη επαφή (με $N_A \gg N_D$) σε θερμική ισορροπία.

(β) κατανομή φορτίου χώρου.

(γ) Κατανομή ηλεκτρικού πεδίου.

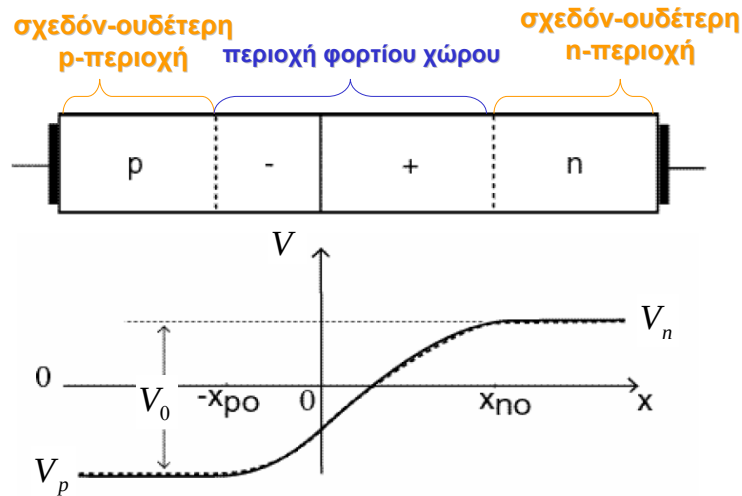
(δ) Κατανομή ηλεκτροστατικού δυναμικού, όπου το V_0 είναι το δυναμικό επαφής



ΤΛ1001 – 2010

L7: Δίοδος Επαφής p-n στη

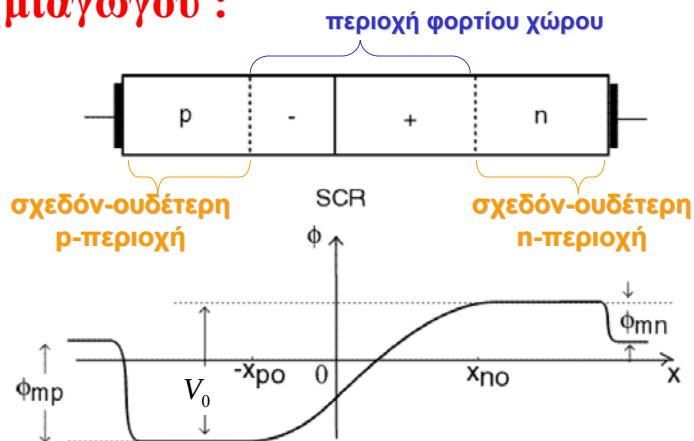
Δυναμικό επαφής



Ερώτηση 1: αν συνδέσω ένα βολτόμετρο στους ακροδέκτες της διόδου επαφής p-n, μπορώ να μετρήσω το δυναμικό επαφής V_0 ;

Ερώτηση 2: Αν βραχυκυκλώσω τους ακροδέκτες της διόδου επαφής p-n, θα υπάρχει ροή ρεύματος στο εξωτερικό κύκλωμα;

Ξεχνάμε το δυναμικό επαφής στις ενώσεις μετάλλου ημιαγωγού :



Επαφές μετάλλου-ημιαγωγού : ένωση διαφορετικών υλικών

$\Rightarrow$ δυναμικά επαφής ϕ_{mn} and ϕ_{mp} .

Η διαφορά δυναμικού διαμέσου της δομής πρέπει να είναι μηδέν :

$\Rightarrow V_0 = |\phi_{mn}| + |\phi_{mp}|$ επομένως δεν μπορούμε να μετρήσουμε το V_0 .