

Φυσική Ημιαγωγικών Διατάξεων

Α. Τασολάμπρου, Επ. Καθ. Τομέας Ε

atasolam@phys.uoa.gr



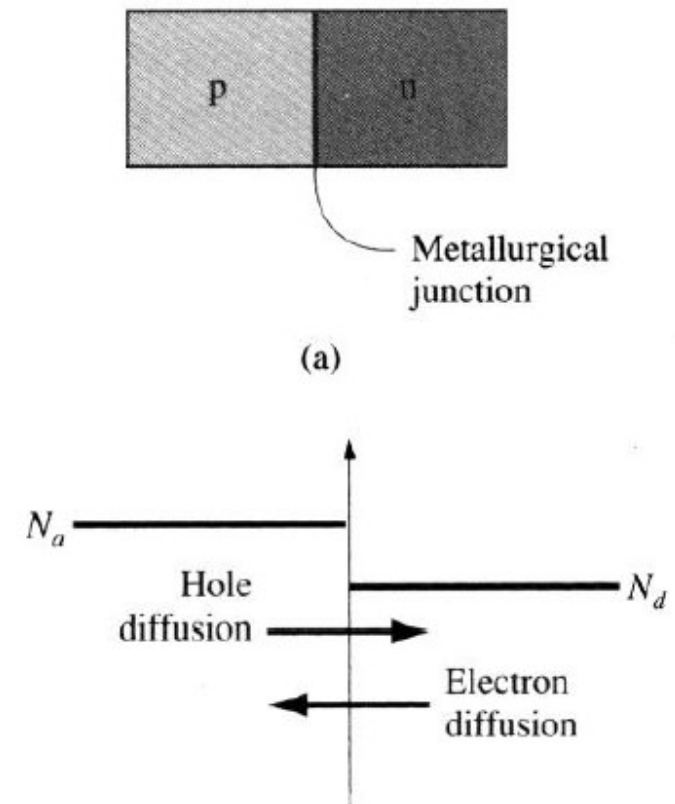
HELLENIC REPUBLIC
National and Kapodistrian
University of Athens
— EST. 1837 —

Φυσική Ημιαγωγικών Διατάξεων

Επαφή pn

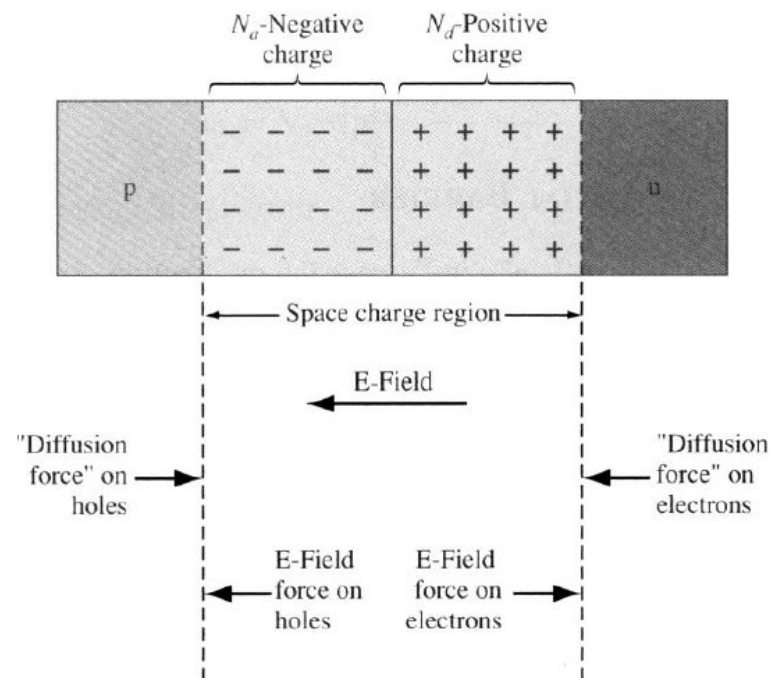
Θα μελετήσουμε την **επαφή pn** που δημιουργείται όταν φέρουμε σε επαφή ένα **ημιαγωγό τύπου n** και ένα **ημιαγωγό τύπου p**. Οι περισσότερες ημιαγωγικές διατάξεις περιέχουν τουλάχιστον μία επαφή pn που τους παρέχει τα χαρακτηριστικά εκείνα που απαιτούνται για ανορθωτές, ενισχυτές, κυκλώματα διακόπτη κ.λ. –

Στην πραγματικότητα μια επαφή pn δημιουργείται όταν σε ένα μονοκρυσταλλικό ημιαγωγό, η μια περιοχή του εμπλουτιστεί με προσμίξεις τύπου δότη, για τη δημιουργία της περιοχής τύπου n και η άλλη με προσμίξεις τύπου αποδέκτη, για τη δημιουργία της περιοχής p. Η διεπιφάνεια που ξεχωρίζει τις δύο περιοχές συνηθίζεται να λέγεται *μεταλλουργική επαφή*



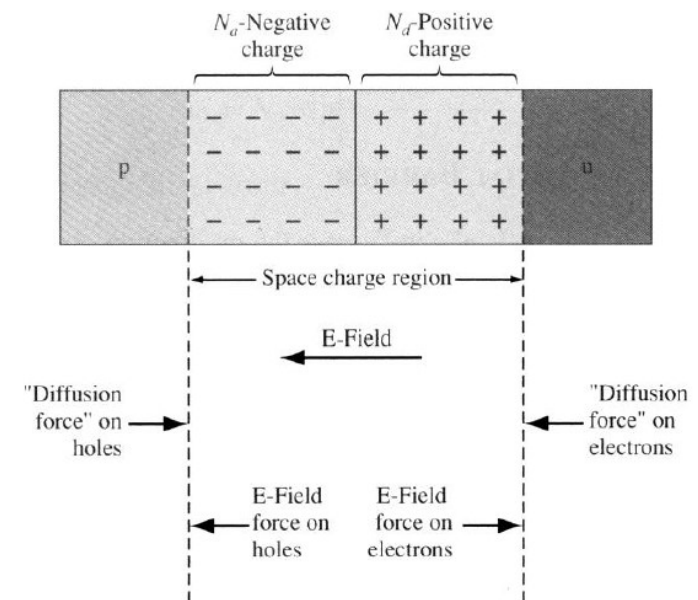
Επαφή pn

Στην πραγματικότητα δεν είναι δυνατόν να αλλάξει απότομα, σε κάποια εσωτερική επιφάνεια του ημιαγωγού, ο τύπος προσμίξεων από δότες σε αποδέκτες. Για λόγους απλούστευσης της ανάλυσης, θα θεωρήσουμε, αρχικά, ότι έχουμε τη **λεγόμενη απότομη επαφή pn**, όπου η συγκέντρωση προσμίξεων είναι ομοιόμορφη σε κάθε περιοχή και υπάρχει μία απότομη αλλαγή στον τύπο των προσμίξεων στην μεταλλουργική επαφή. Άρα στην μεταλλουργική επαφή θα υπάρχει αρχικά μία πολύ μεγάλη διαβάθμιση στις συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και των οπών.



Επαφή pn

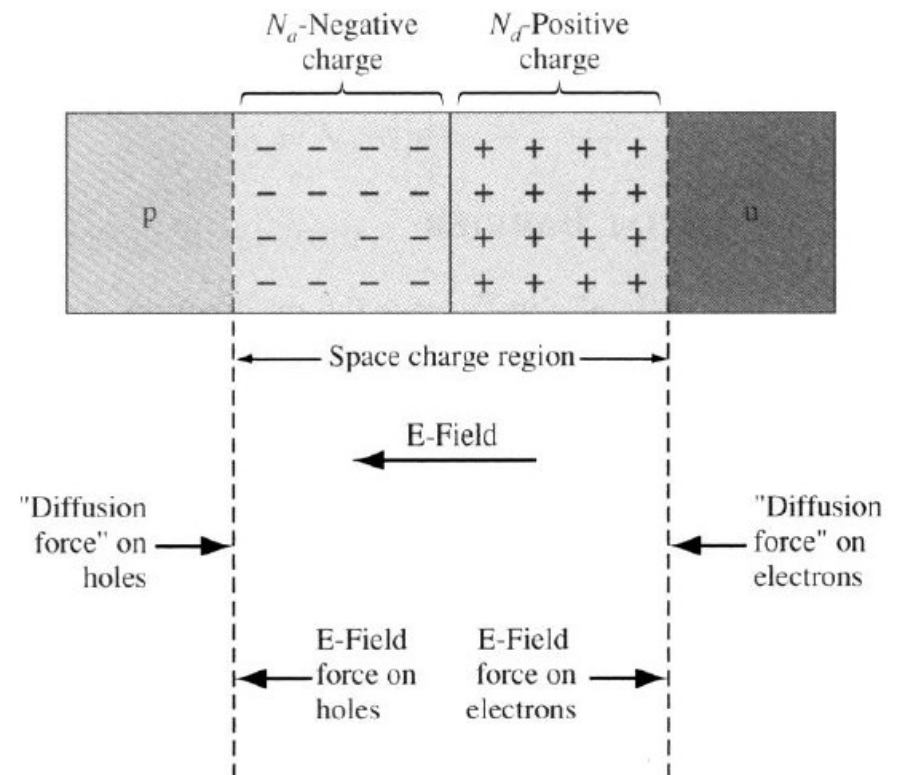
Ηλεκτρόνια, που είναι οι φορείς πλειονότητας της περιοχής n θα αρχίσουν **να διαχέονται** μέσα στην περιοχή p και αντίστοιχα οπές, που είναι οι φορείς πλειονότητας της περιοχής p, θα αρχίσουν να διαχέονται μέσα στην περιοχή n. Καθώς τα ηλεκτρόνια φεύγουν από την περιοχή n αφήνουν πίσω τους θετικά φορτισμένα άτομα δοτών. Αντίστοιχα οι οπές που εγκαταλείπουν την περιοχή p αφήνουν πίσω τους αρνητικά φορτισμένα άτομα αποδεκτών.



Οι δύο αυτές περιοχές αποτελούν την λεγόμενη περιοχή φορτίων χώρου (*space charge region*) Η περιοχή φορτίων χώρου ονομάζεται και περιοχή απογύμνωσης (*depletion region*) διότι έχει απογυμνωθεί από κάθε ευκίνητο φορέα.

Επαφή pn

Τα θετικά και τα αρνητικά φορτία των περιοχών n και p δημιουργούν ένα **ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή κοντά στην μεταλλουργική επαφή με φορά από το θετικό προς το αρνητικό φορτίο**. Στα άκρα τις περιοχής φορτίων χώρου θα ασκούνται στα ηλεκτρόνια και στις οπές δυνάμεις διάχυσης, που είναι αντίθετες από τις δυνάμεις που ασκούνται λόγω του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή φορτίων χώρου. Στην κατάσταση ισορροπίας οι δύο αυτές δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε τύπο φορέα εξισορροποούνται.



Επαφή pn

επαφή pn σε κατάσταση **θερμικής ισορροπίας**

☐ δεν υπάρχουν ρεύματα

☐ δεν εφαρμόζεται κάποια εξωτερική τάση στην pn επαφή

Επαφή pn

Εάν θεωρήσουμε ότι δεν εφαρμόζεται καμία τάση στην επαφή τότε βρισκόμαστε σε **κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Το επίπεδο Fermi είναι σταθερό** στο όλο σύστημα. Οι ζώνες αγωγιμότητας και σθένους θα καμπυλώνονται στην περιοχή φορτίων χώρου εφόσον οι θέσεις τους σε σχέση με το επίπεδο Fermi είναι διαφορετικές στην n και p περιοχή.

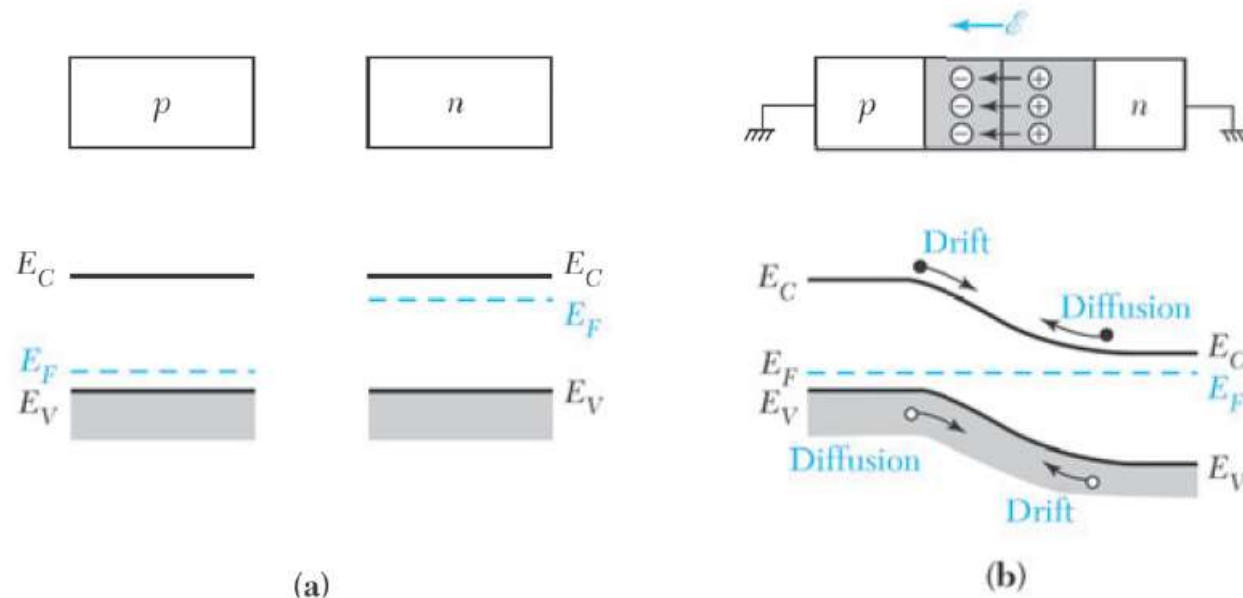
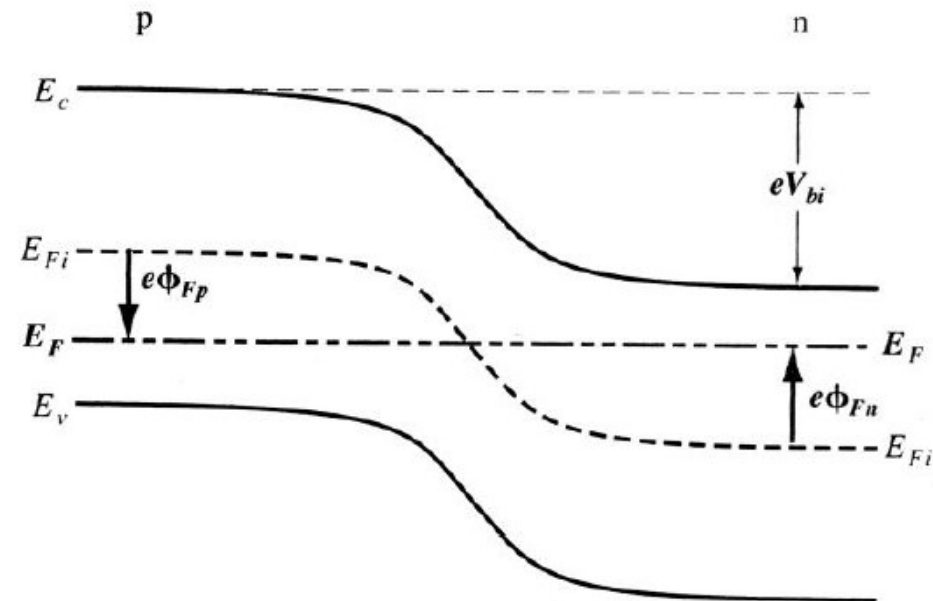
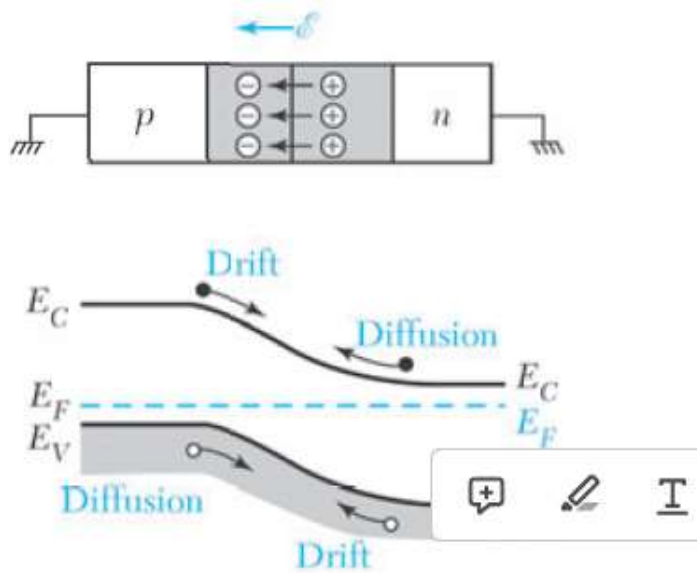


Fig. 2 (a) Uniformly doped p -type and n -type semiconductors before the junction is formed. (b) The electric field in the depletion region and the energy band diagram of a p - n junction in thermal equilibrium.

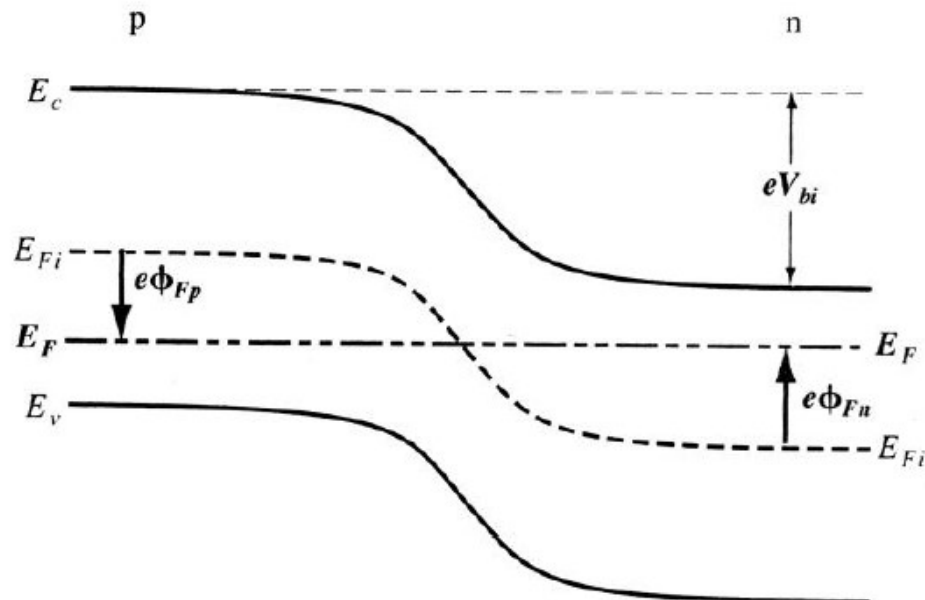
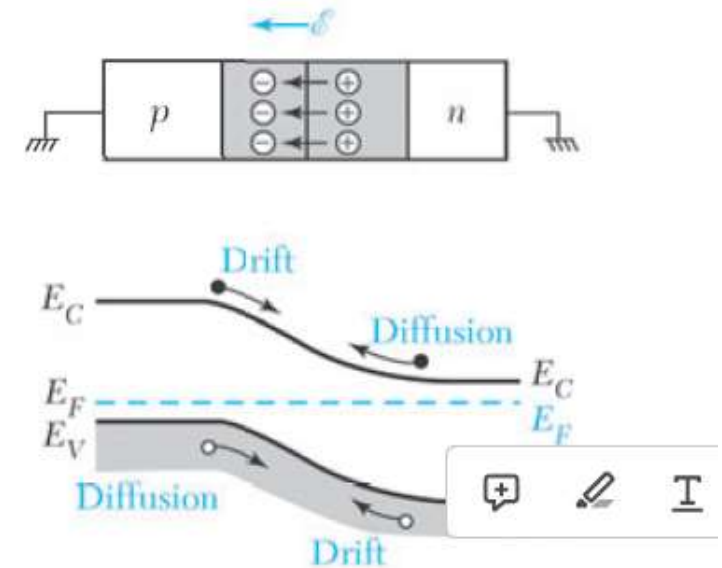
Επαφή pn

Εάν θεωρήσουμε ότι δεν εφαρμόζεται καμία τάση στην επαφή τότε βρισκόμαστε σε **κατάσταση θερμικής ισορροπίας**. Το **επίπεδο Fermi** είναι **σταθερό** στο όλο σύστημα. Οι ζώνες αγωγιμότητας και σθένους θα καμπυλώνονται στην περιοχή φορτίων χώρου εφόσον οι θέσεις τους σε σχέση με το επίπεδο Fermi είναι διαφορετικές στην n και p περιοχή.



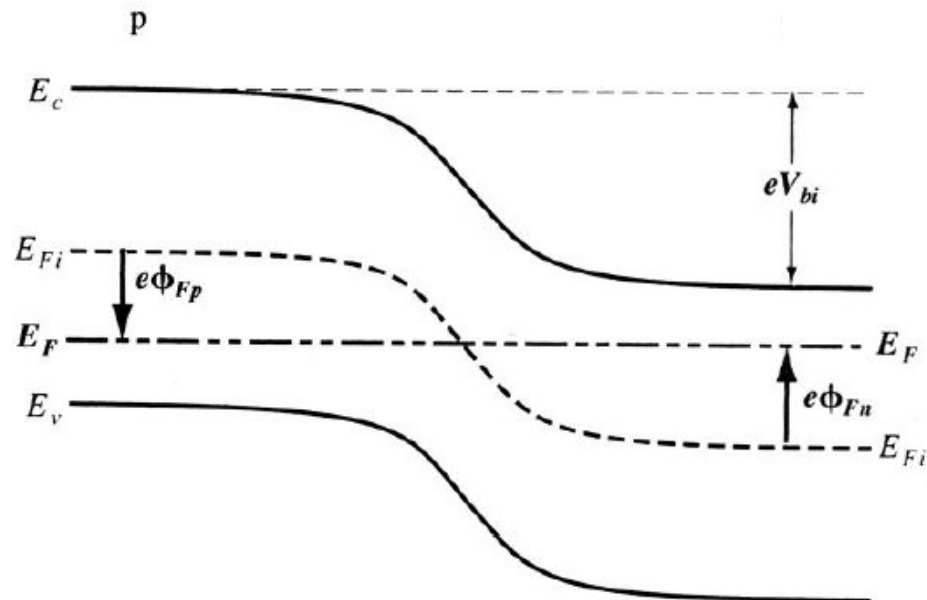
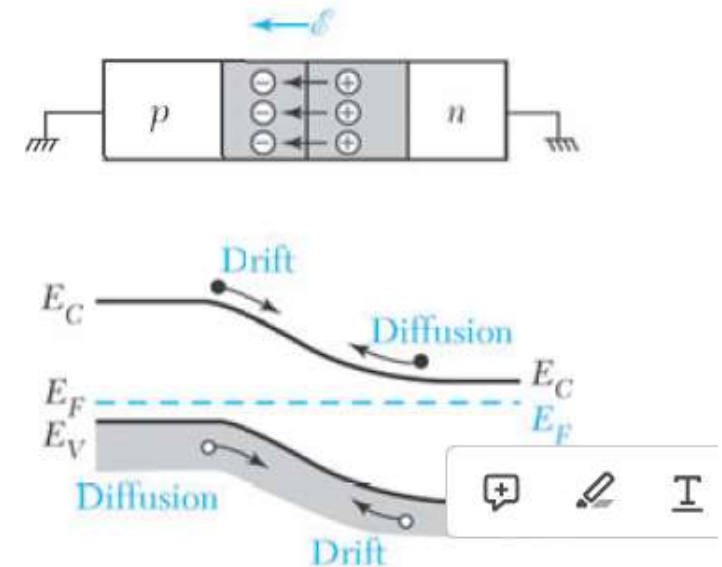
Επαφή pn

Τα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας στην περιοχή n βλέπουν ένα φραγμό δυναμικού όταν προσπαθήσουν να περάσουν στη ζώνη αγωγιμότητας της περιοχής. Αυτό το ύψος φραγμού δυναμικού ονομάζεται **δυναμικό επαφής ή δυναμικό διάχυσης** (εφ' όσον οφείλεται ουσιαστικά σε διάχυση φορέων από την μια πλευρά της μεταλλουργικής επαφής στην άλλη) και συμβολίζεται με V_{bi} .



Επαφή pn

Τα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας στην περιοχή n βλέπουν ένα φραγμό δυναμικού όταν προσπαθήσουν να περάσουν στη ζώνη αγωγιμότητας της περιοχής. Αυτό το ύψος φραγμού δυναμικού ονομάζεται **δυναμικό επαφής ή δυναμικό διάχυσης** (εφ' όσον οφείλεται ουσιαστικά σε διάχυση φορέων από την μια πλευρά της μεταλλουργικής επαφής στην άλλη) και συμβολίζεται με V_{bi} .

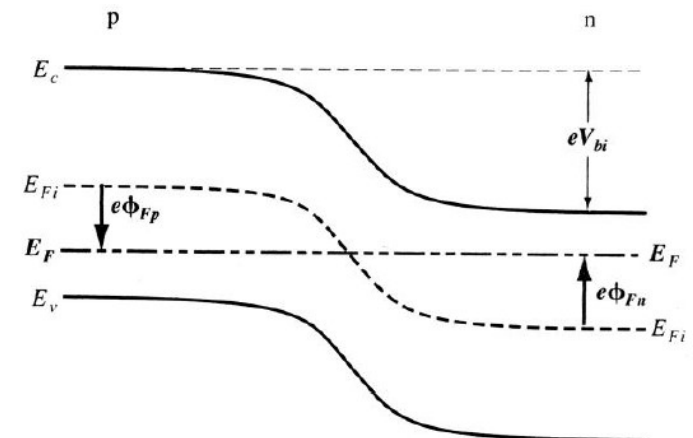
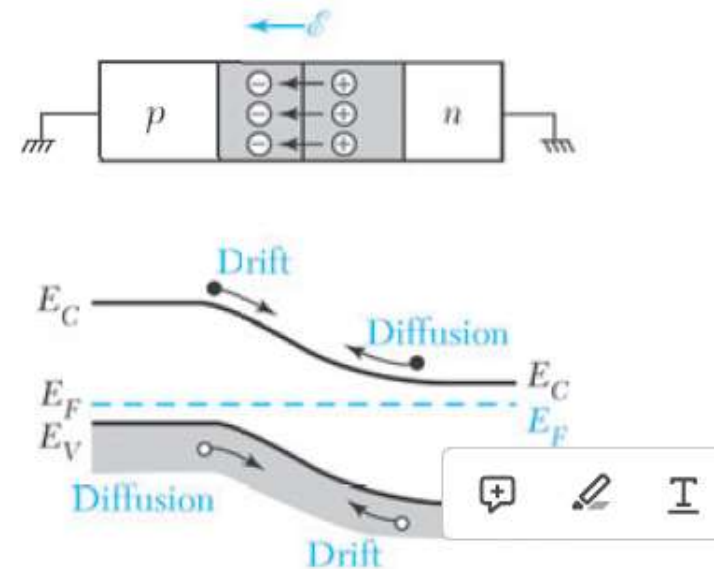


Η ολική διαφορά ηλεκτροστατικού δυναμικού μεταξύ των p- and n- (built in potential)

Επαφή pn

Το επίπεδο Fermi E_{Fi} στον ενδογενή ημιαγωγό ισαπέχει από τα άκρα της ζώνης αγωγιμότητας σε όλη την επαφή (όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3) και μπορούμε να υπολογίσουμε το δυναμικό επαφής χρησιμοποιώντας τη διαφορά μεταξύ των επιπέδων Fermi ενδογενούς ημιαγωγού στις περιοχές n και p. θα ισχύει:

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



Φυσική Ημιαγωγικών Διατ

Στην περιοχή n η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας θα είναι:

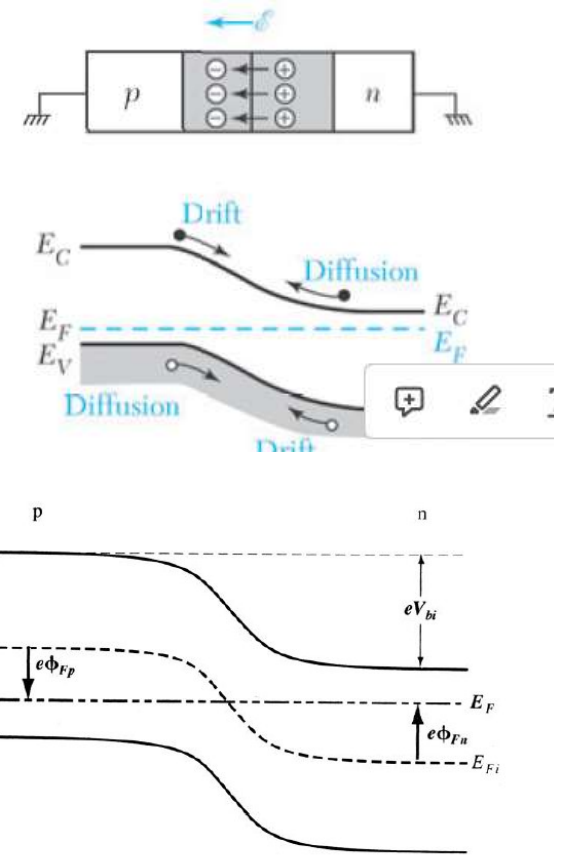
$$n_o = N_C \exp\left[\frac{-(E_C - E_F)}{kT}\right] = n_i \exp\left[\frac{(E_F - E_{Fi})}{kT}\right]$$

όπου n_i η συγκέντρωση φορέων ενδογενούς ημιαγωγού. Το δυναμικό Φ_{Fn} στην περιοχή n καθορίζεται σε:

$$e\Phi_{Fn} = E_{Fi} - E_F$$

Άρα

$$n_o = n_i \exp\left[\frac{-e\Phi_{Fn}}{kT}\right]$$



Επαφή pn

Αν θεωρήσουμε πλήρη ιονισμό των προσμίξεων ώστε το $n_0 = N_d$ και λογαριθμήσουμε την 1.4 καταλήγουμε στην σχέση :

$$\Phi_{Fn} = -\frac{kT}{e} \ln\left(\frac{n_0}{n_i}\right) \Rightarrow \Phi_{Fn} = -\frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right) \quad (1.5)$$

Αντίστοιχα στην περιοχή p η συγκέντρωση οπών είναι :

$$p_0 = N_a = n_i \exp\left[\frac{(E_{Fi} - E_F)}{kT}\right] \quad (1.6)$$

και το δυναμικό Φ_{Fp} καθορίζεται ως :

$$e\Phi_{Fp} = E_{Fi} - E_F \quad (1.7)$$

Επαφή pn

Από τις (1.6) και (1.7) προκύπτει ότι:

$$\Phi_{\text{Fp}} = +\frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) \quad (1.8)$$

Αν αντικαταστήσουμε τις (1.5) και (1.8) στην εξίσωση (1.1) καταλήγουμε στην παρακάτω έκφραση για το δυναμικό επαφής:

$$V_{\text{bi}} = +\frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) = V_{\text{th}} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right) \quad (1.9)$$

όπου $V_{\text{th}}=kT/e$ είναι η θερμική τάση.

δυναμικό επαφής ή δυναμικό διάχυσης
(built in potential)

Επαφή pn

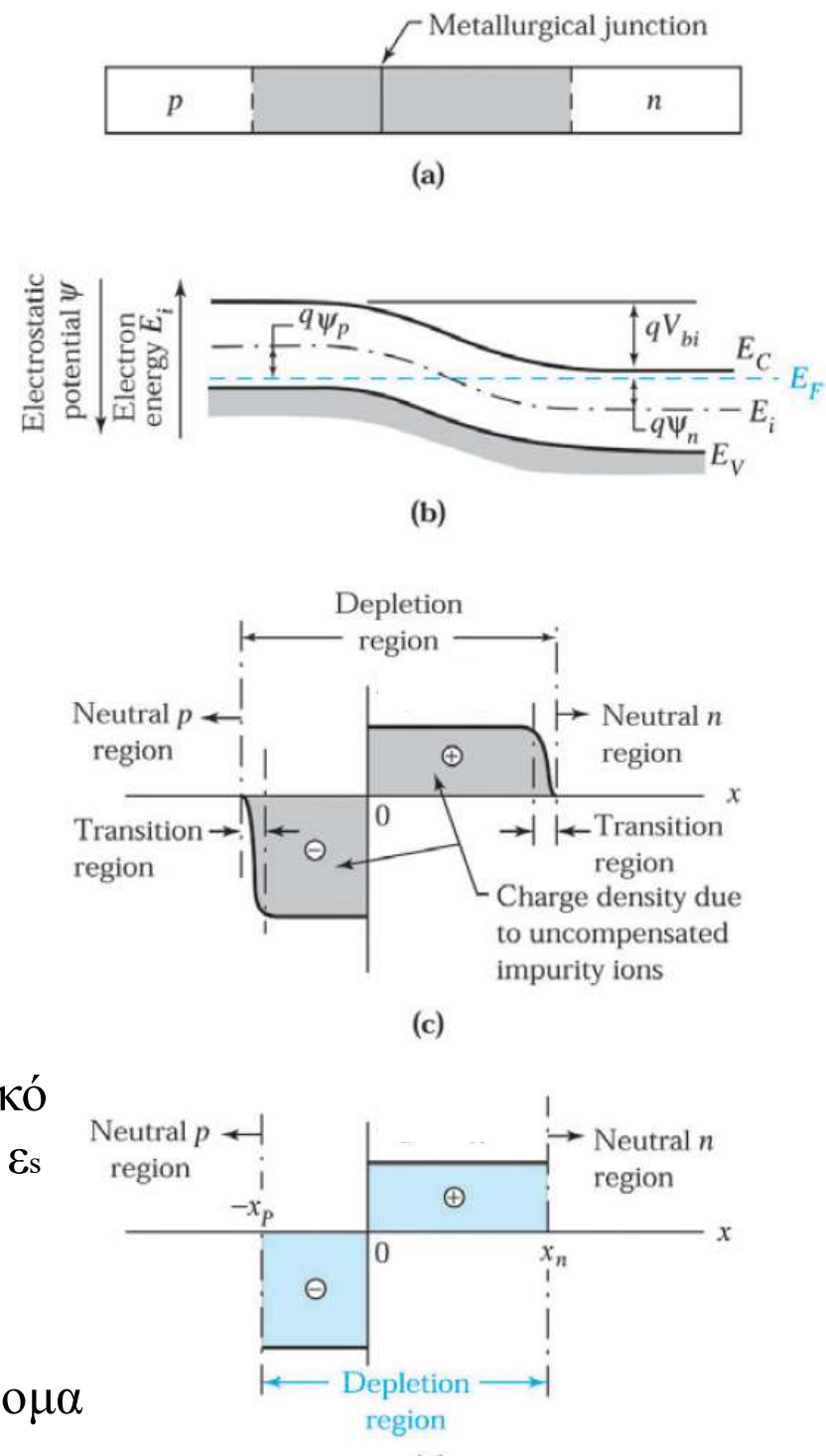
Στην περιοχή φορτίων χώρου όπως είπαμε δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο.

Η κατανομή του φορτίου χώρου και το ηλεκτροστατικό δυναμικό δίνονται από την εξίσωση Poisson (αν θεωρήσουμε πλήρη ιονισμό των προσμίξεων)

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

όπου $\phi(x)$ είναι το ηλεκτρικό δυναμικό, $E(x)$ το ηλεκτρικό πεδίο, $\rho(x)$ η πυκνότητα φορτίου ανά μονάδα όγκου και ϵ_s η διηλεκτρική σταθερά του ημιαγωγού.

Θεωρούμε ότι η περιοχή φορτίων χώρου τελειώνει απότομα στην περιοχή n στο x_n και στην περιοχή p στο $-x_p$.



Επαφή pn

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

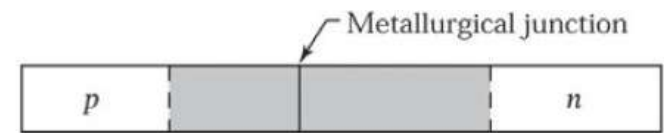
Από το οι πυκνότητες φορτίου είναι:

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

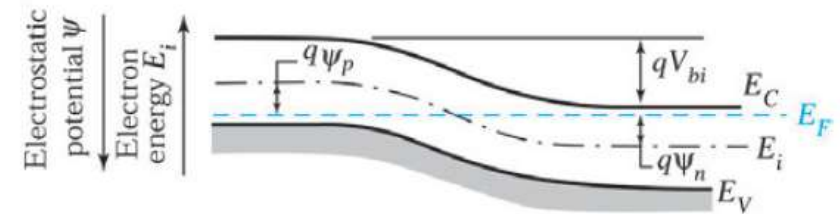
$$\rho(x) = eN_d \quad 0 < x < x_n$$

Το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή p υπολογίζεται με ολοκλήρωση της εξίσωσης Poisson

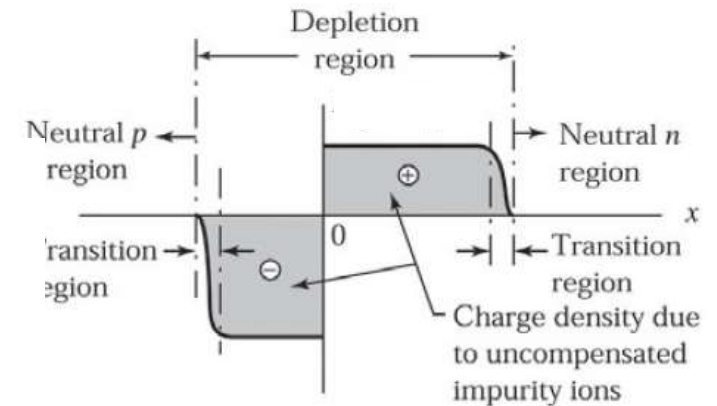
$$E = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} dx = -\int \frac{eN_a}{\epsilon_s} dx = \frac{-eN_a}{\epsilon_s} x + C_1 \quad -x_p < x < 0$$



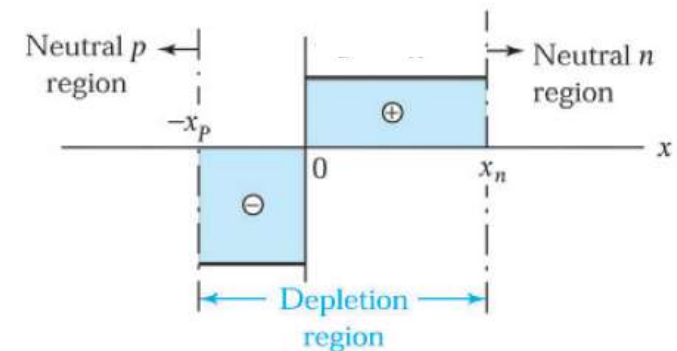
(a)



(b)



(c)



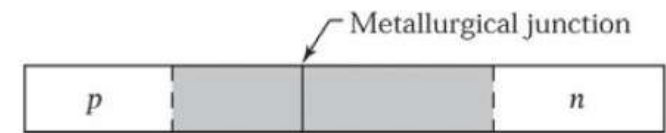
Επαφή pn

$$E = \int \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} dx = - \int \frac{eN_a}{\epsilon_s} dx = - \frac{eN_a}{\epsilon_s} x + C_1 \quad -x_p < x < 0$$

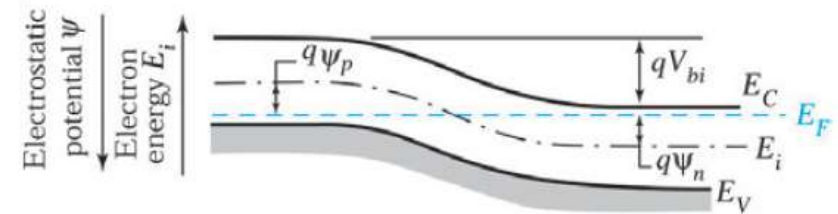
- όπου C_1 είναι η σταθερά ολοκλήρωσης.
- Το ηλεκτρικό πεδίο θεωρείται μηδενικό στην ουδέτερη p περιοχή για $x < -x_p$ εφόσον τα ρεύματα είναι μηδενικά στην θερμική ισορροπία και είναι μία συνεχής συνάρτηση.
- Η σταθερά ολοκλήρωσης υπολογίζεται θέτοντας $E=0$ για $x = -x_p$.

$$\frac{eN_a}{\epsilon_s} x_p + C_1 = 0 \Rightarrow C_1 = - \frac{eN_a}{\epsilon_s} x_p$$

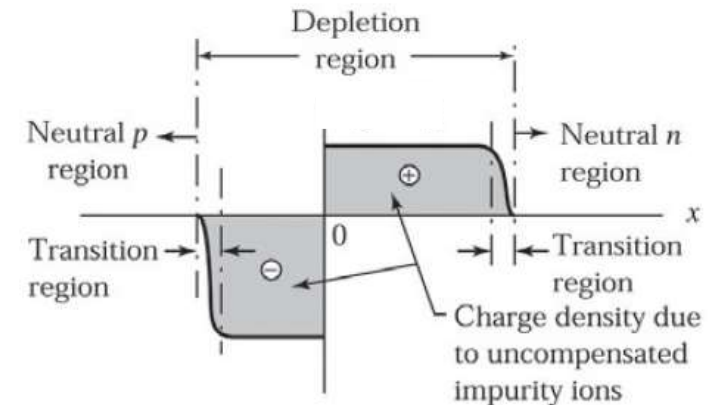
$$E = \frac{-eN_a}{\epsilon_s} (x + x_p) \quad -x_p \leq x \leq 0$$



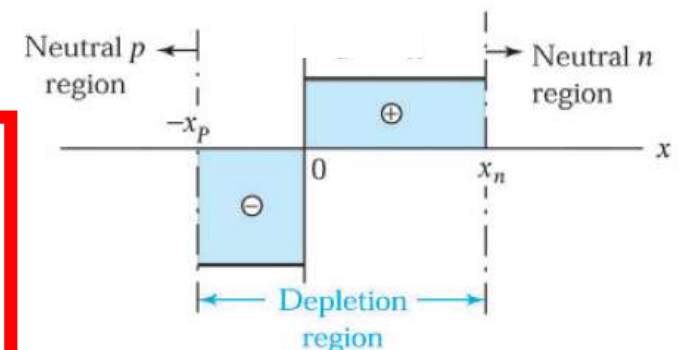
(a)



(b)



(c)



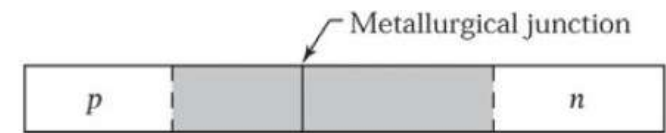
Επαφή pn

Στην **περιοχή n** το ηλεκτρικό πεδίο υπολογίζεται από τη σχέση :

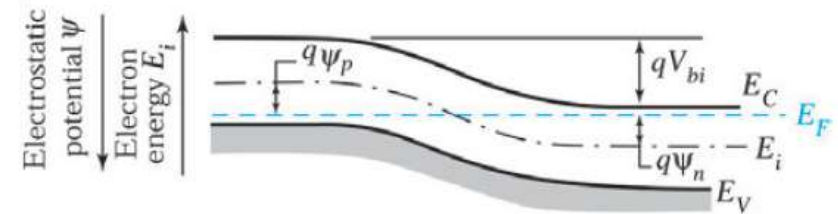
$$E = \int \frac{(eN_d)}{\epsilon_s} dx = \frac{eN_d}{\epsilon_s} x + C_2$$

όπου C_2 η σταθερά ολοκλήρωσης. Αντίστοιχα η σταθερά C_2 υπολογίζεται θέτοντας $E=0$ για $x=x_n$ εφόσον το ηλεκτρικό πεδίο θεωρείται μηδέν στην περιοχή n για $x > x_n$ και είναι συνεχής συνάρτηση.

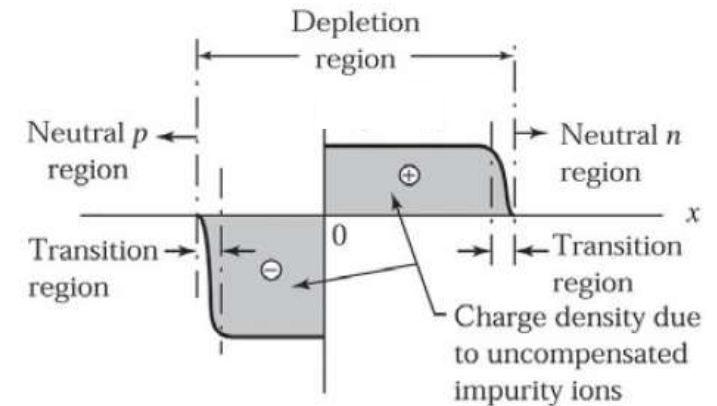
$$E = \frac{-eN_d}{\epsilon_s} (x_n - x) \quad 0 \leq x \leq x_n$$



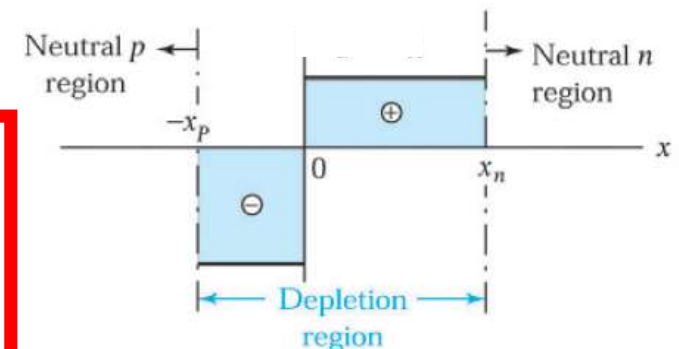
(a)



(b)



(c)



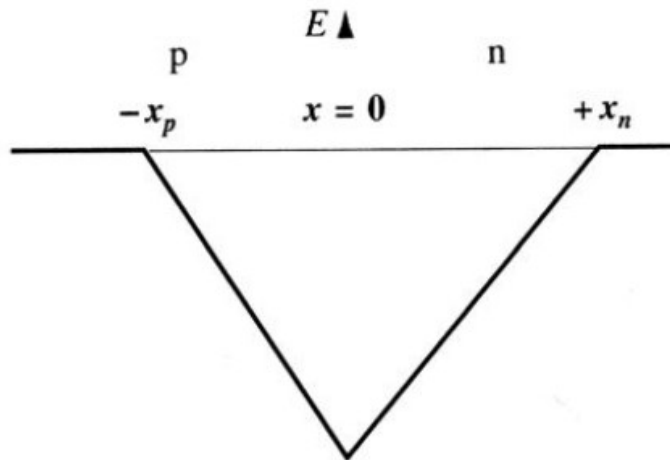
Επαφή pn

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

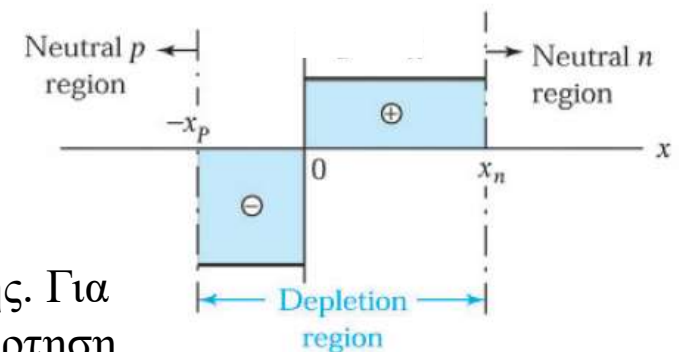
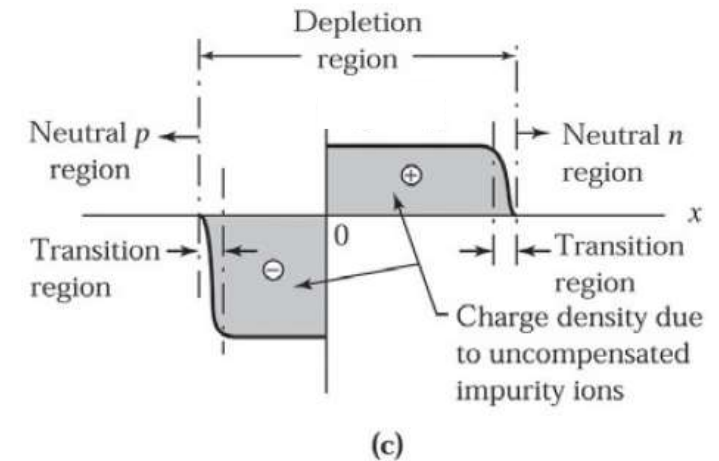
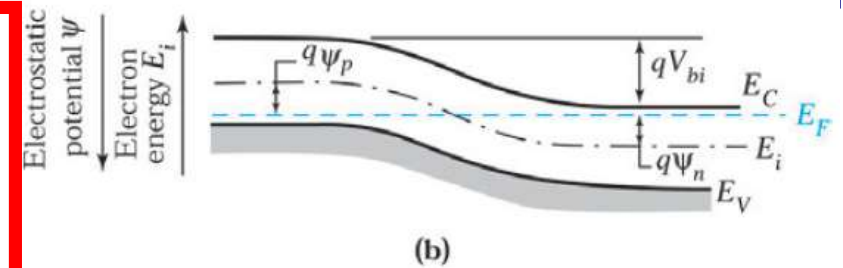
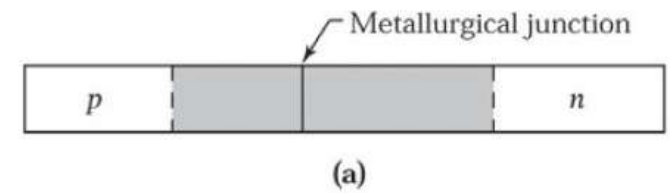
περιοχή p

$$E = \frac{-eN_d}{\epsilon_s} (x_n - x) \quad 0 \leq x \leq x_n$$

περιοχή n



γραφική παράσταση του ηλεκτρικού πεδίου στη περιοχή απογύμνωσης. Για επαφή pn με ομοιόμορφη κατανομή προσμίξεων είναι γραμμική συνάρτηση της απόστασης από την επαφή με μέγιστη τιμή στην μεταλλουργική επαφή.



Επαφή pn

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

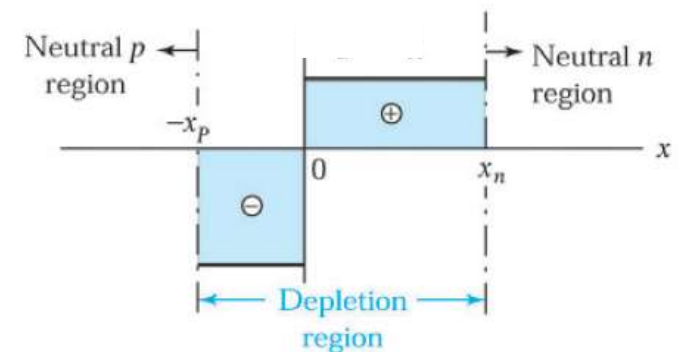
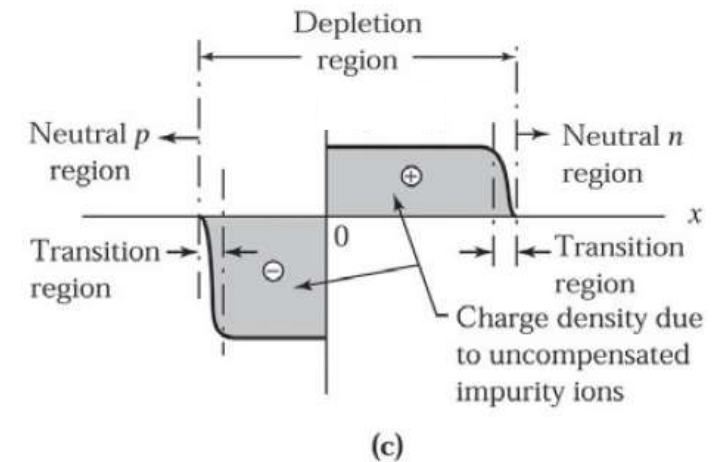
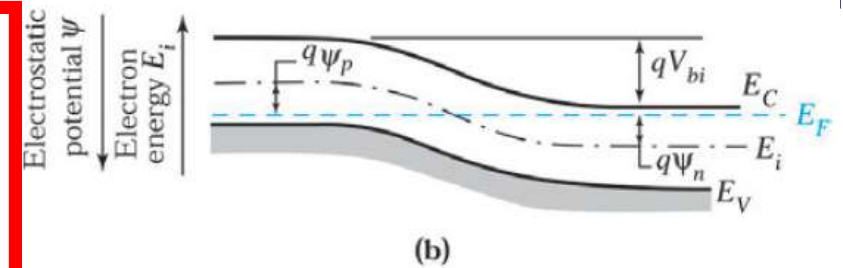
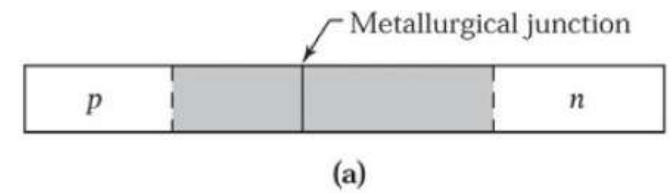
περιοχή p

$$E = \frac{-eN_d}{\epsilon_s} (x_n - x) \quad 0 \leq x \leq x_n$$

περιοχή n

*το ηλεκτρικό πεδίο είναι συνεχής
συνάρτηση και στη μεταλλουργική επαφή*

$$N_a x_p = N_d x_n$$

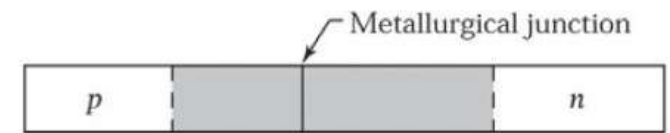


Επαφή pn

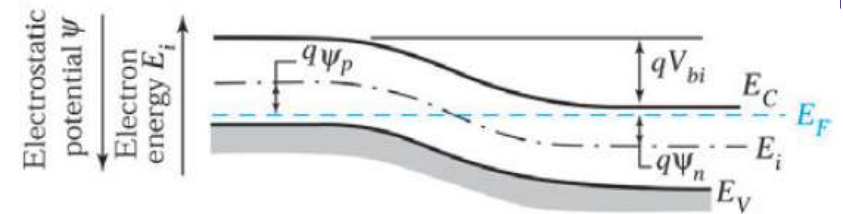
*το ηλεκτρικό πεδίο είναι συνεχής
συνάρτηση και στη μεταλλουργική επαφή*

$$N_a X_p = N_d X_n$$

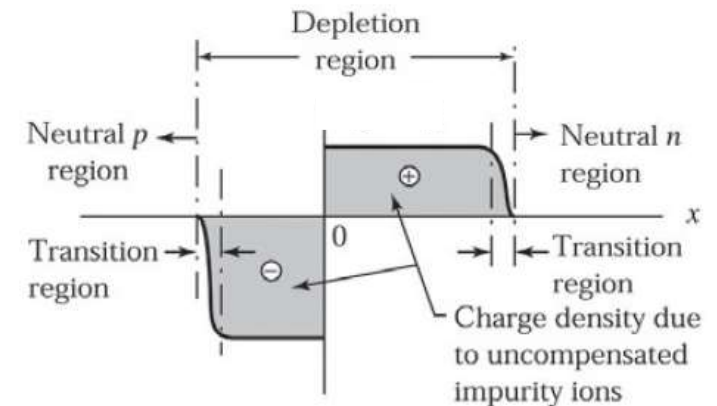
*Η σχέση μας δηλώνει ότι ο αριθμός των
αρνητικών φορτίων ανά μονάδα επιφανείας στην
περιοχή p είναι ίσος με τον αριθμό των θετικών
φορτίων ανά μονάδα επιφανείας της περιοχής n.*



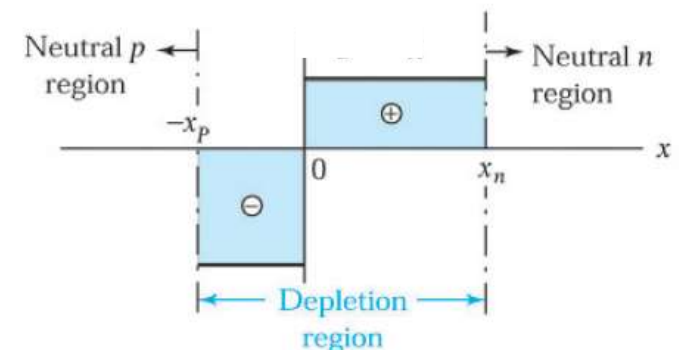
(a)



(b)



(c)



Επαφή pn

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

$$E = \frac{-eN_d}{\epsilon_s} (x_n - x) \quad 0 \leq x \leq x_n$$

Το δυναμικό στην επαφή θα υπολογιστεί ολοκληρώνοντας το ηλεκτρικό πεδίο.

Στην περιοχή p έχουμε

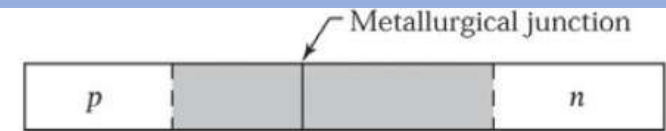
$$\phi(x) = -\int E(x) dx = \int \frac{eN_a}{\epsilon_s} (x + x_p) dx$$

$$\phi(x) = \frac{eN_a}{\epsilon_s} \left(\frac{x^2}{2} + x_p \cdot x \right) + C_1'$$

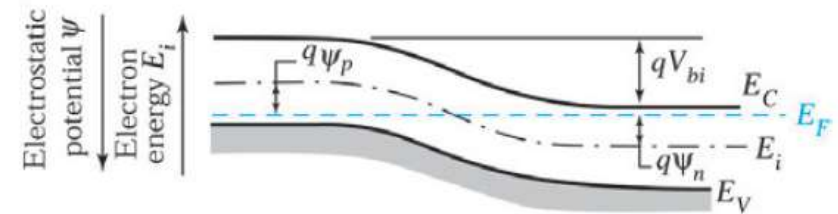
Όπου C_1' είναι η σταθερά ολοκλήρωσης.

Στην pn επαφή μας ενδιαφέρει περισσότερο η **διαφορά δυναμικού** στην επαφή παρά η απόλυτη τιμή του δυναμικού. Έτσι θέτουμε αυθαίρετα το δυναμικό μηδέν στο $x = -x_p$ και η σταθερά ολοκλήρωσης υπολογίζεται

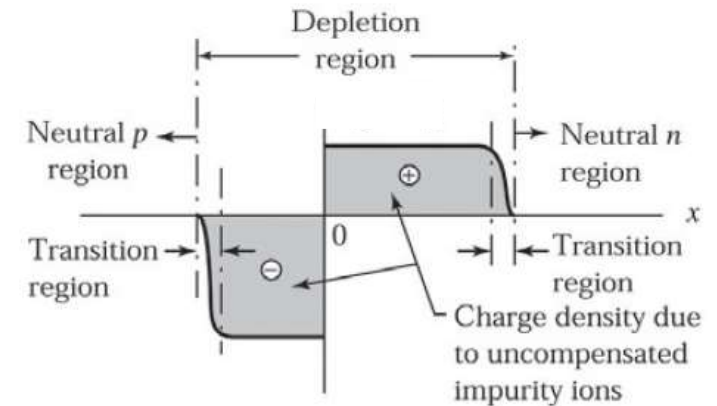
$$C_1' = \frac{eN_a}{2\epsilon_s} x_p^2$$



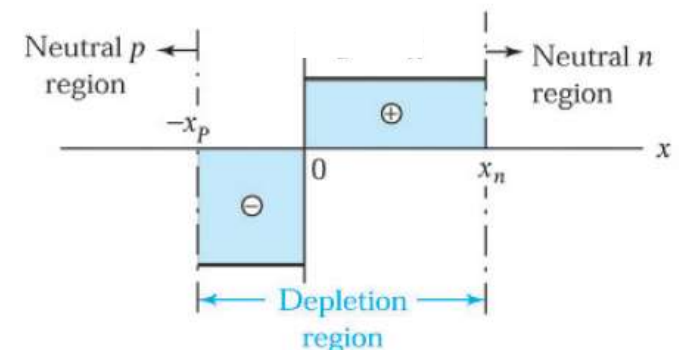
(a)



(b)



(c)



Επαφή pn

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

$$E = \frac{-eN_d}{\epsilon_s} (x_n - x) \quad 0 \leq x \leq x_n$$

Το δυναμικό στην επαφή θα υπολογιστεί ολοκληρώνοντας το ηλεκτρικό πεδίο.

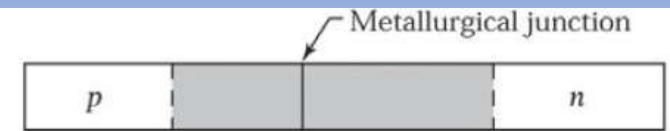
Στην περιοχή n έχουμε

$$\phi(x) = \int \frac{eN_d}{\epsilon_s} (x_n - x) dx$$

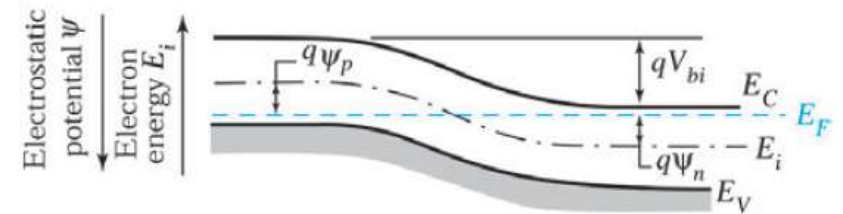
$$\phi(x) = \frac{eN_d}{\epsilon_s} \left(x_n \cdot x - \frac{x^2}{2} \right) + C_2'$$

το δυναμικό είναι συνεχής συνάρτηση, για $x=0$

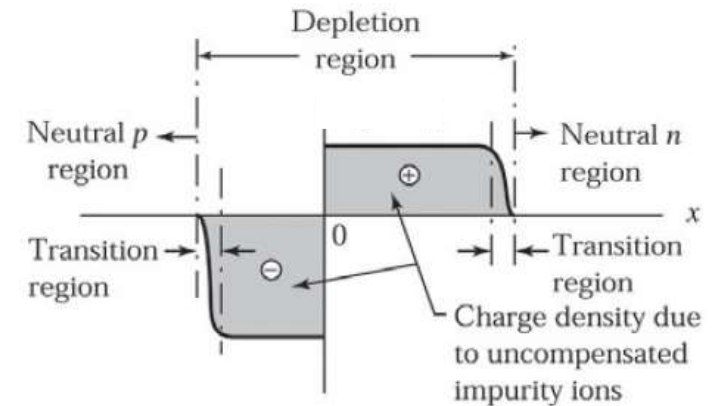
$$C_2' = \frac{eN_a}{2\epsilon_s} x_p^2$$



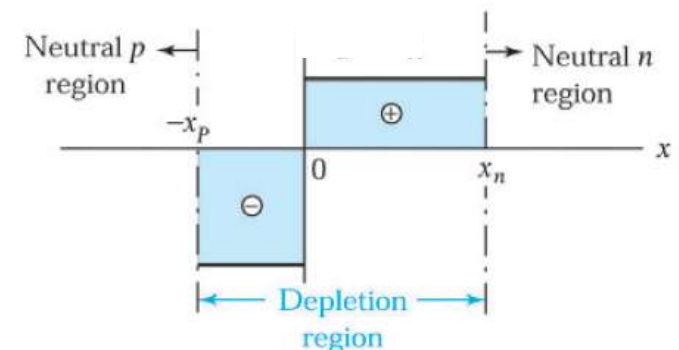
(a)



(b)



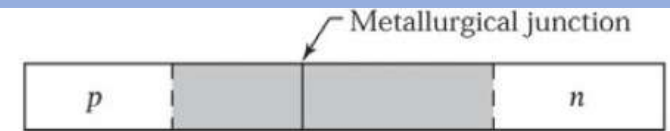
(c)



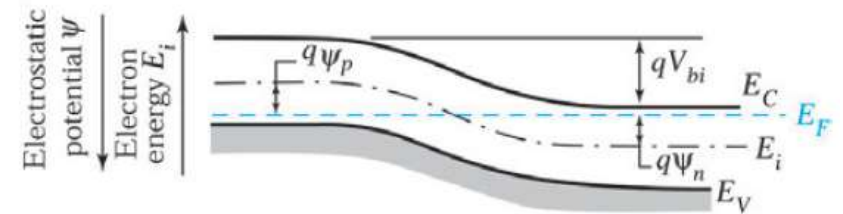
Επαφή pn

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

$$E = \frac{-eN_d}{\epsilon_s} (x_n - x) \quad 0 \leq x \leq x_n$$



(a)



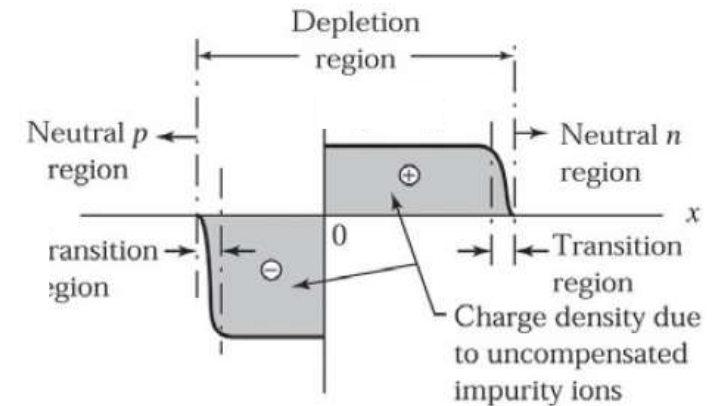
(b)

$$\phi(x) = \frac{eN_a}{2\epsilon_s} (x + x_p)^2 \quad -x_p \leq x \leq 0$$

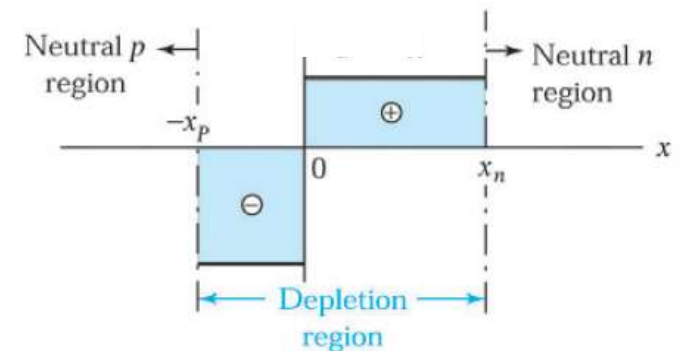
περιοχή p

$$\phi(x) = \frac{eN_d}{\epsilon_s} \left(x_n \cdot x - \frac{x^2}{2} \right) + \frac{eN_a}{2\epsilon_s} x_p^2 \quad (0 \leq x \leq x_n)$$

περιοχή n



(c)



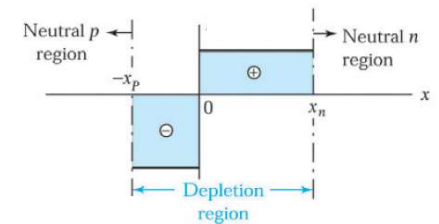
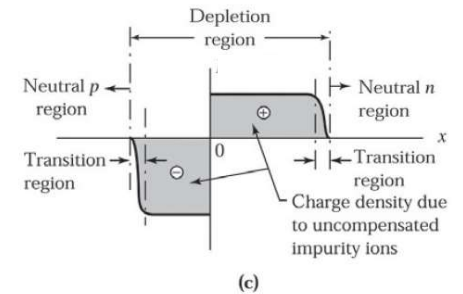
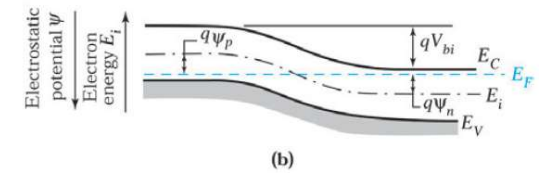
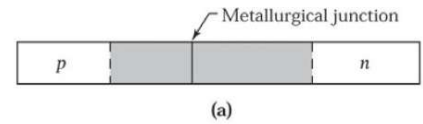
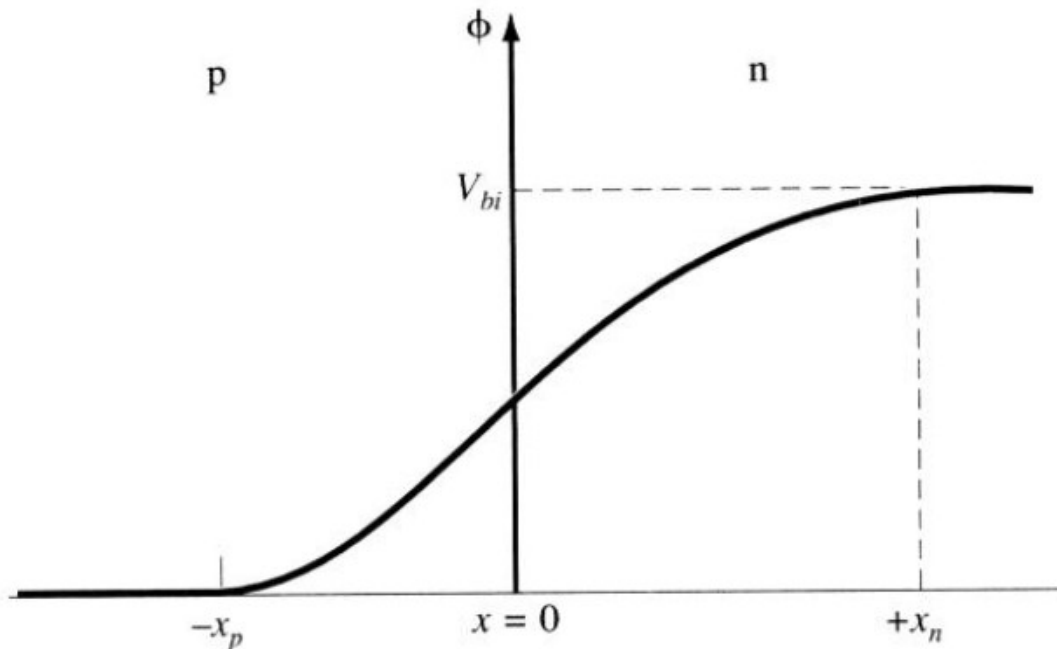
Επαφή pn

$$\phi(x) = \frac{eN_a}{2\epsilon_s} (x + x_p)^2 \quad -x_p \leq x \leq 0$$

περιοχή p

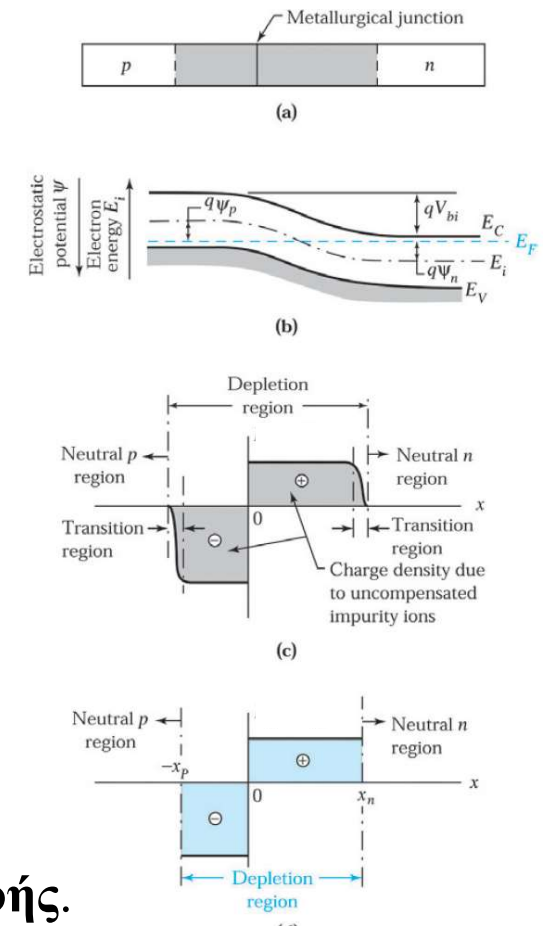
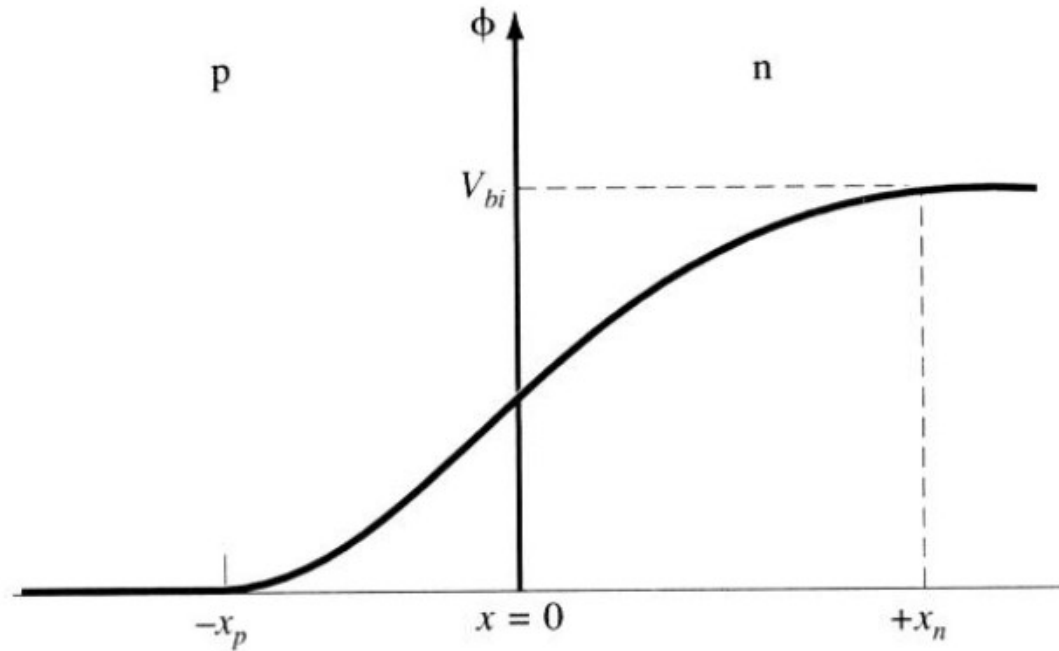
$$\phi(x) = \frac{eN_d}{\epsilon_s} \left(x_n \cdot x - \frac{x^2}{2} \right) + \frac{eN_a}{2\epsilon_s} x_p^2 \quad (0 \leq x \leq x_n)$$

περιοχή n



Ηλεκτρικό δυναμικό στην περιοχή φορτίων χώρου επαφής pn

Επαφή pn



Η τιμή του δυναμικού στο $x=x_n$ θα ισούται με το δυναμικό επαφής.

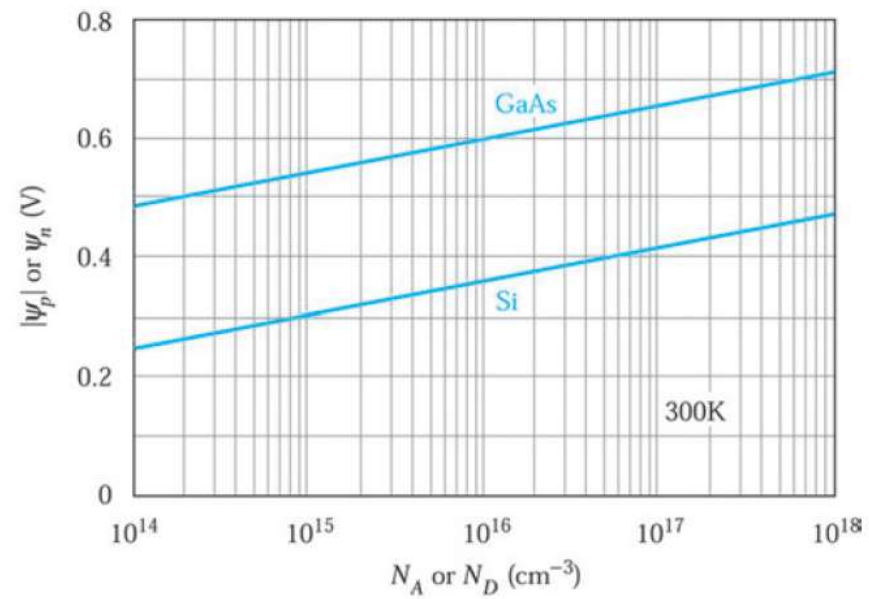
$$V_{bi} = |\phi(x = x_n)| = \frac{e}{2\epsilon_s} (N_d x_n^2 + N_a x_p^2)$$

$$V_{bi} = + \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = V_{th} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right)$$

Επαφή pn

Παράδειγμα: Υπολογίστε το δυναμικό επαφής σε μια pn από Si

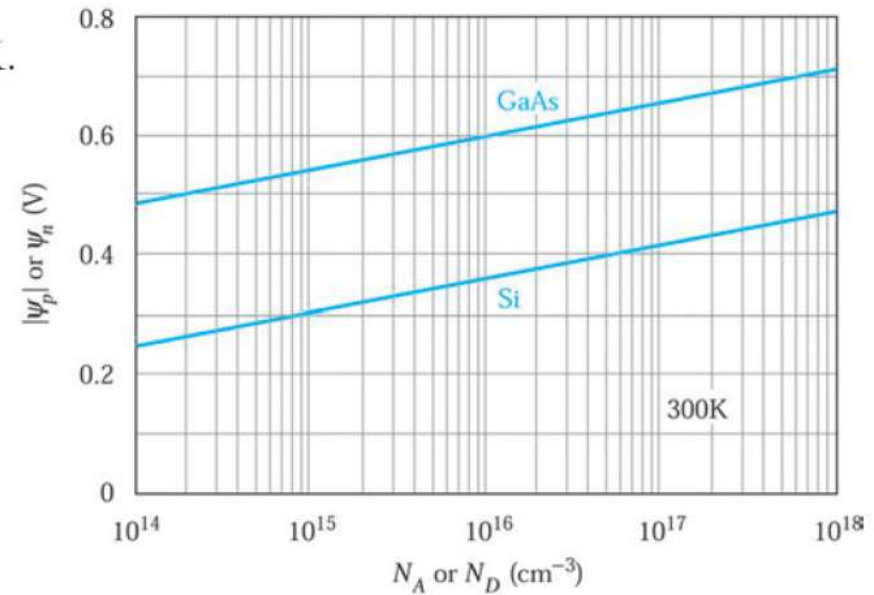
$$N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3} \text{ and } N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3} \text{ at } 300 \text{ K.}$$



Επαφή pn

Παράδειγμα: Υπολογίστε το δυναμικό επαφής σε μια pn από Si

$N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ at 300 K.



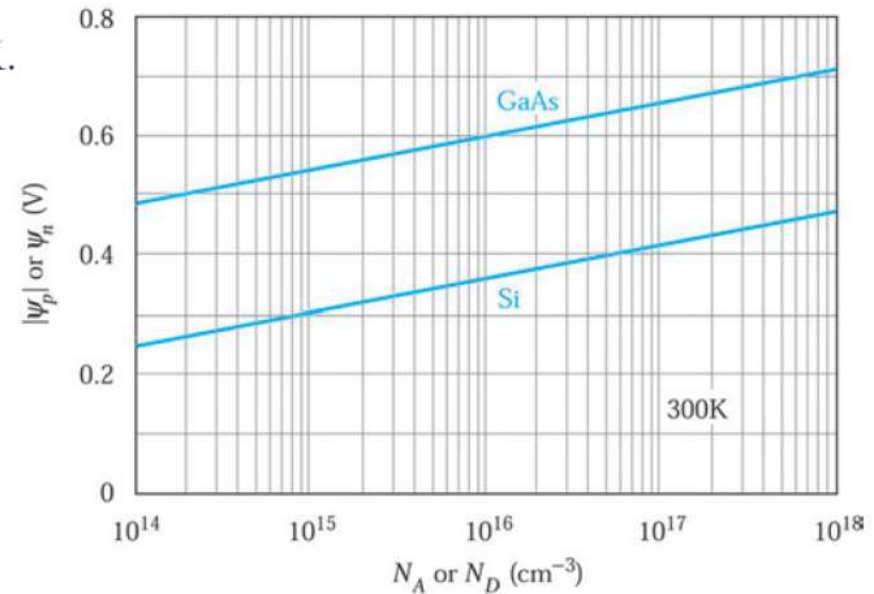
$$V_{bi} = +\frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = V_{th} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

$$V_{bi} = (0.0259) \ln\left[\frac{10^{18} \times 10^{15}}{(9.65 \times 10^9)^2}\right] = 0.774 \text{ V.}$$

Επαφή pn

Παράδειγμα: Υπολογίστε το δυναμικό επαφής σε μια pn από Si

$N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ and $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ at 300 K.



$$V_{bi} = +\frac{kT}{e} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = V_{th} \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$$

$$V_{bi} = (0.0259) \ln\left[\frac{10^{18} \times 10^{15}}{(9.65 \times 10^9)^2}\right] = 0.774 \text{ V.}$$

$$V_{bi} = \psi_n + |\psi_p| = 0.30 \text{ V} + 0.47 \text{ V} = 0.77 \text{ V.}$$

Επαφή pn

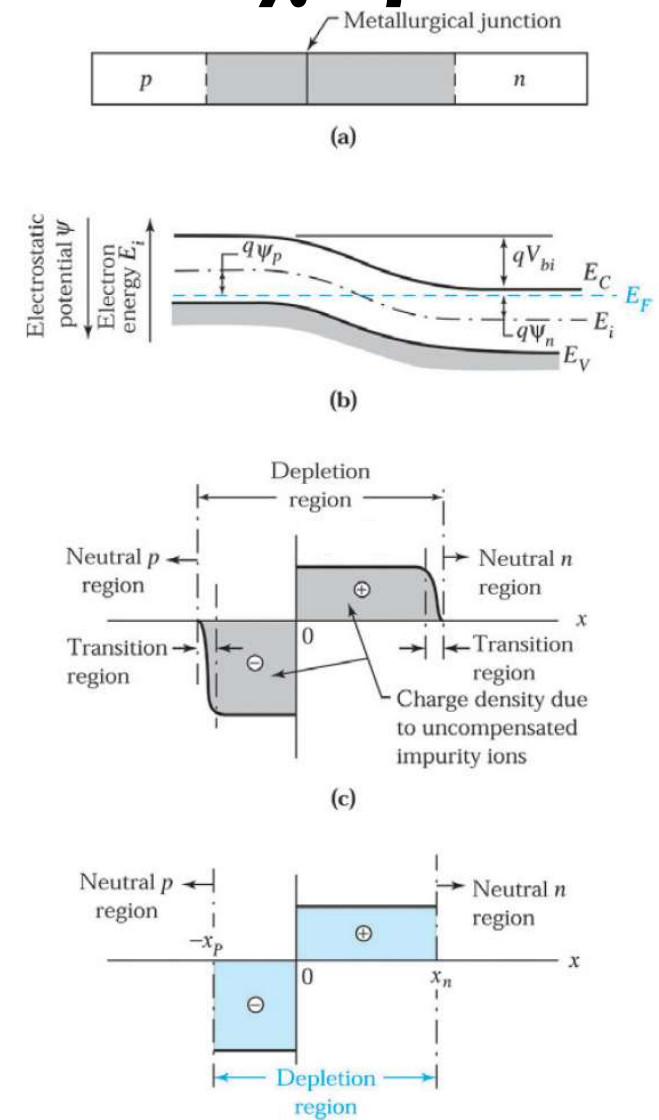
Πλάτος της περιοχής φορτίων χώρου

- Στην συνέχεια θα καθορίσουμε την απόσταση στην οποία εκτείνεται η περιοχή φορτίων χώρου μέσα στις περιοχές n και p. Η απόσταση αυτή είναι γνωστή σαν *πλάτος της περιοχής φορτίων χώρου*.

το ηλεκτρικό πεδίο είναι συνεχής συνάρτηση και στη μεταλλουργική επαφή

$$N_a X_p = N_d X_n$$

Η σχέση μας δηλώνει ότι ο αριθμός των αρνητικών φορτίων ανά μονάδα επιφανείας στην περιοχή p είναι ίσος με τον αριθμό των θετικών φορτίων ανά μονάδα επιφανείας της περιοχής n.



Επαφή pn

Πλάτος της περιοχής φορτίων χώρου

$$N_{\alpha} X_p = N_d X_n$$

$$X_p = \frac{N_d X_n}{N_{\alpha}}$$

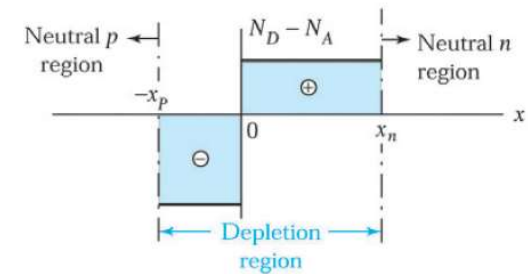
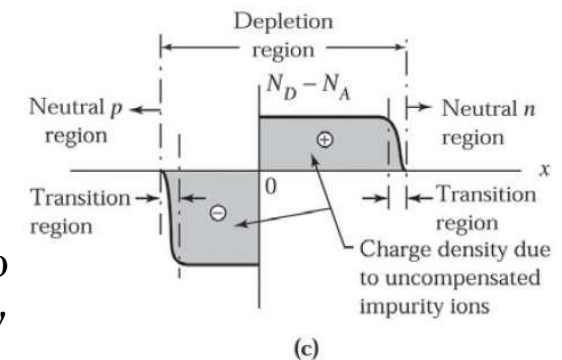
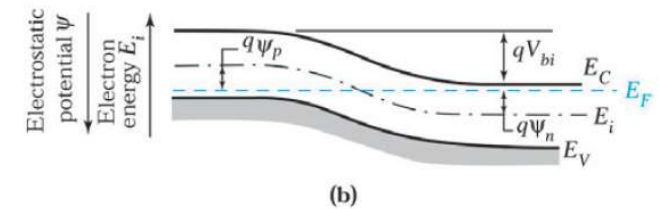
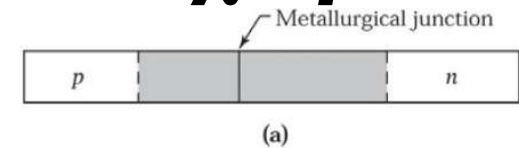
$$V_{bi} = |\phi(x = x_n)| = \frac{e}{2 \epsilon_s} (N_d X_n^2 + N_{\alpha} X_p^2)$$

$$X_n = \left\{ \frac{2 \epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_{\alpha}}{N_d} \right] \left[\frac{1}{N_{\alpha} + N_d} \right] \right\}^{1/2}$$

$$X_p = \left\{ \frac{2 \epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_d}{N_{\alpha}} \right] \left[\frac{1}{N_{\alpha} + N_d} \right] \right\}^{1/2}$$

πλάτος της περιοχής
απογύμνωσης x_n που
εκτείνεται μέσα στην
περιοχή n

πλάτος της περιοχής
απογύμνωσης x_p που
εκτείνεται μέσα στην
περιοχή p



Επαφή pn

Πλάτος της περιοχής φορτίων χώρου

$$X_n = \left\{ \frac{2 \epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_a}{N_d} \right] \left[\frac{1}{N_a + N_d} \right] \right\}^{1/2}$$

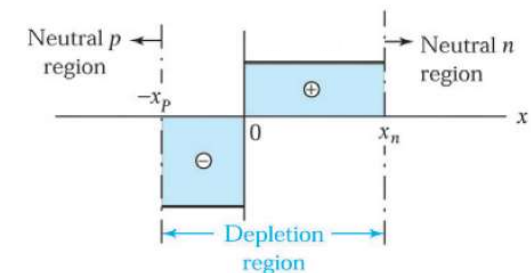
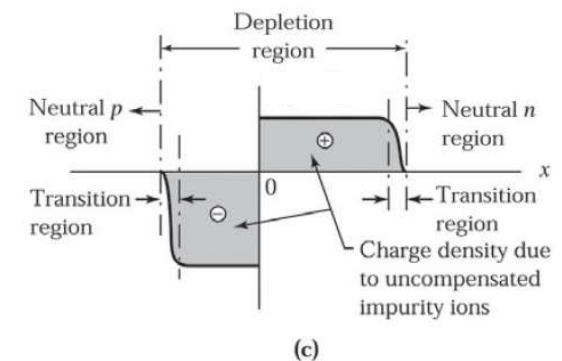
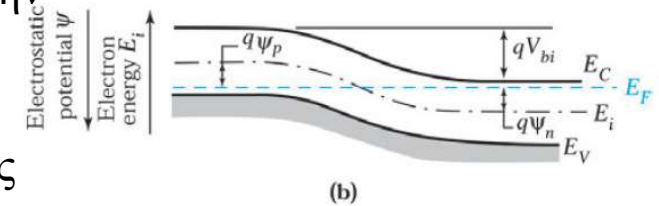
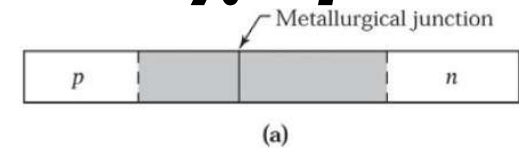
$$X_p = \left\{ \frac{2 \epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_d}{N_a} \right] \left[\frac{1}{N_a + N_d} \right] \right\}^{1/2}$$

$$W = X_n + X_p$$

$$W = \left\{ \frac{2 \epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right] \right\}^{1/2}$$

πλάτος της περιοχής απογύμνωσης x_n που εκτείνεται μέσα στην περιοχή n

πλάτος της περιοχής απογύμνωσης x_p που εκτείνεται μέσα στην περιοχή p



Επαφή pn

1. Να υπολογιστεί το δυναμικό επαφής μιας επαφής pn πυριτίου σε θερμοκρασία $T=300\text{K}$ για $N_a=5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_d=10^{16} \text{ cm}^{-3}$
2. Να υπολογιστούν τα δυναμικά επαφής V_{bi} επαφών pn πυριτίου, γερμανίου και GaAs σε θερμοκρασία $T=300\text{K}$ για
 - α) $N_a=10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_d=10^{14} \text{ cm}^{-3}$
 - β) $N_a=5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_d=5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
 - γ) $N_a=10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_d=10^{17} \text{ cm}^{-3}$

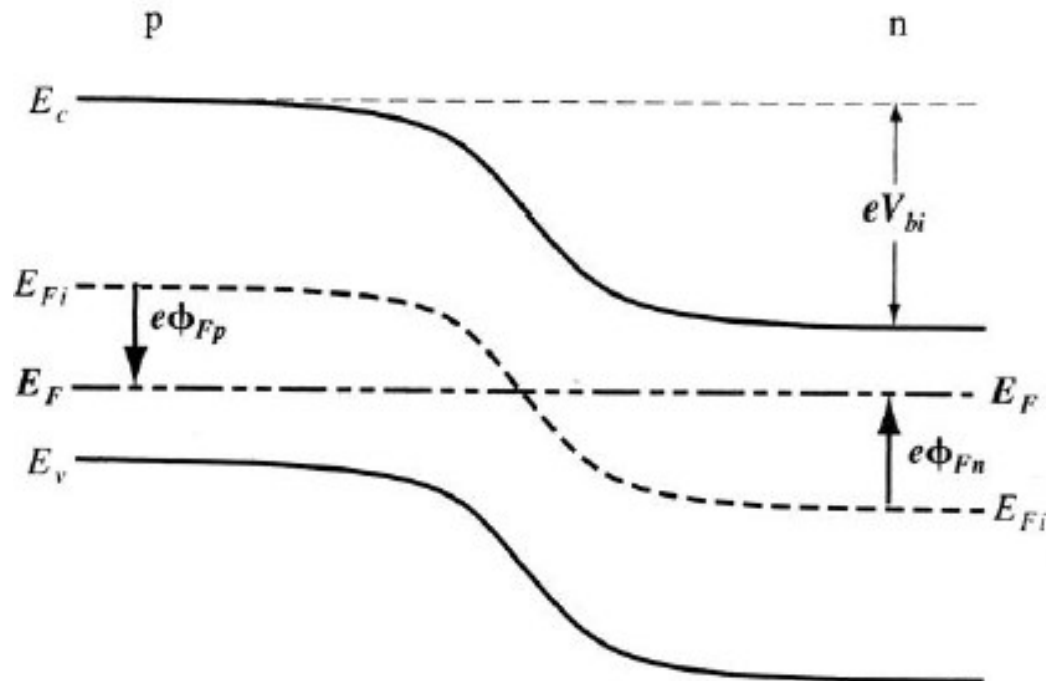
Επαφή pn

Εφαρμογή ανάστροφης τάσης πόλωσης

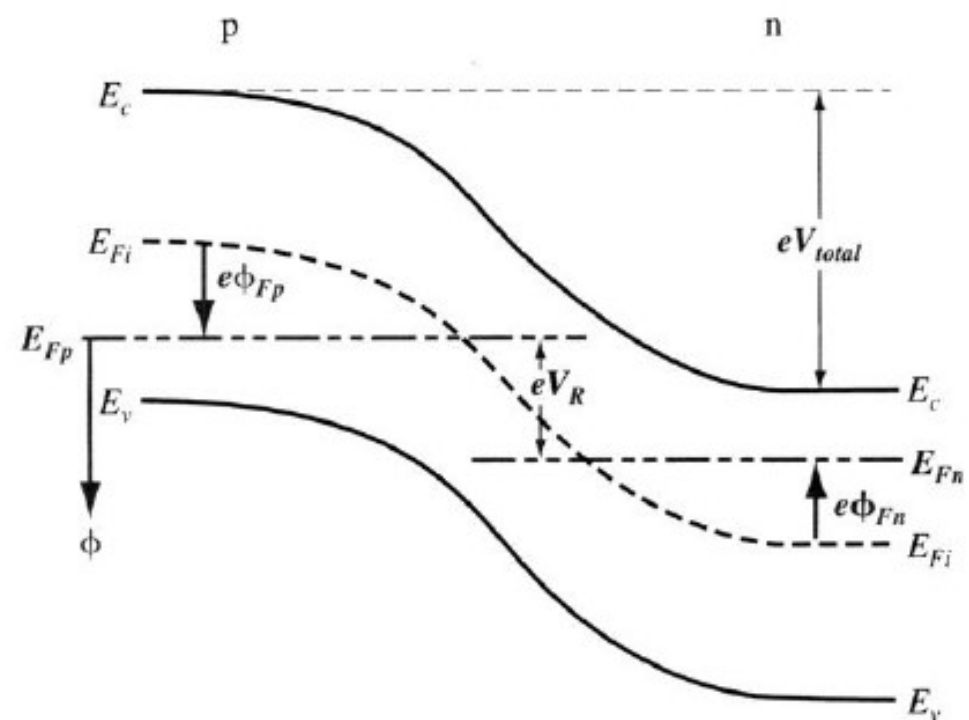
- Εάν εφαρμόσουμε μία πόλωση στα άκρα της pn επαφής δεν θα έχουμε πλέον ισορροπία και το *επίπεδο Fermi* δεν θα είναι πλέον σταθερό στο όλο σύστημα.

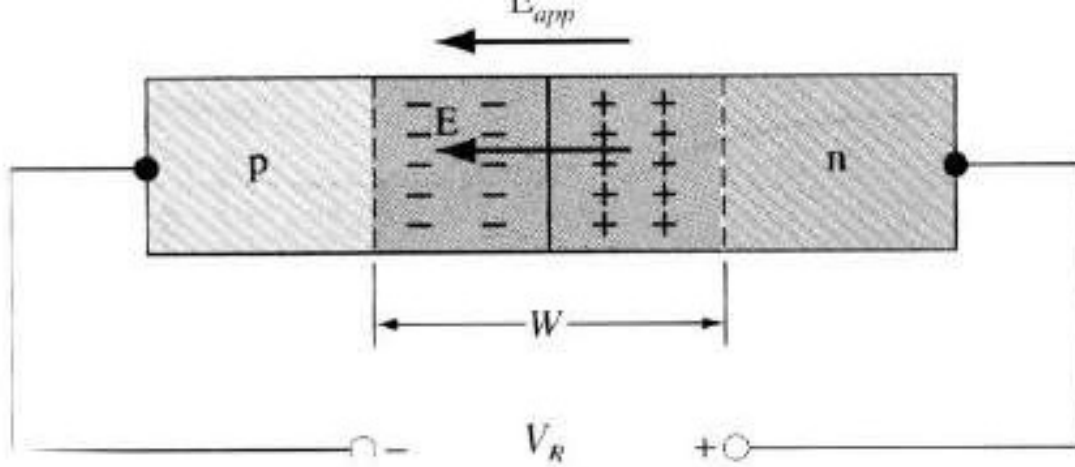
θετική τάση στην περιοχή n σε σχέση με την περιοχή p

Ενεργειακό διάγραμμα επαφής pn
σε θερμική ισορροπία



Ενεργειακό διάγραμμα επαφής pn
υπό ανάστροφη πόλωση





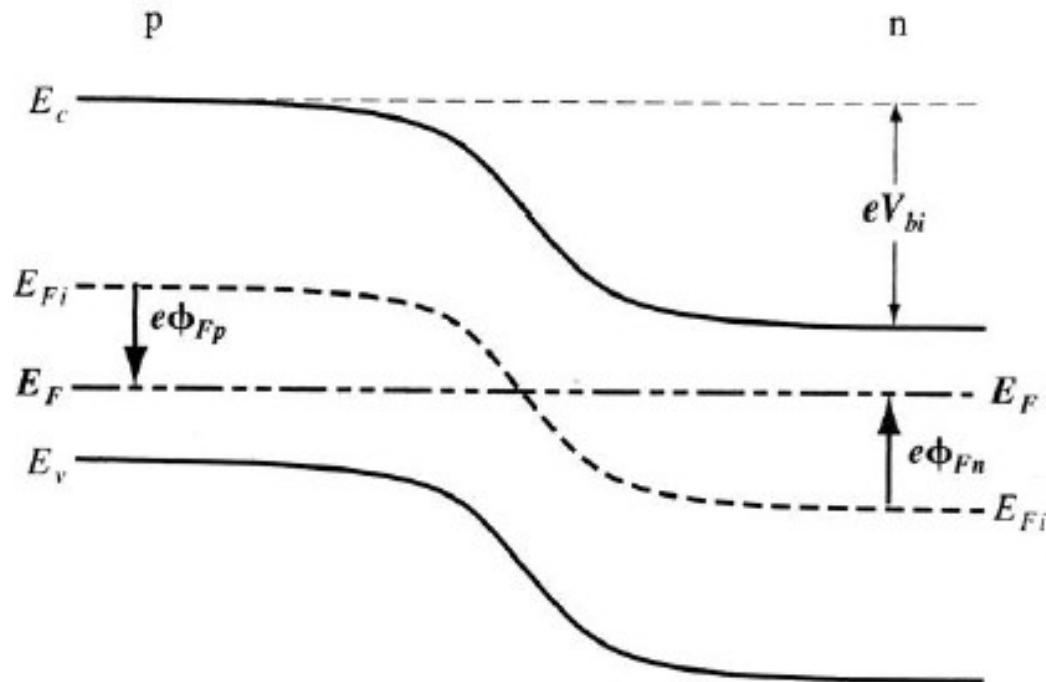
Σχήμα 1.8 Η επαφή pn υπό ανάστροφη πόλωση

ης πόλωσης

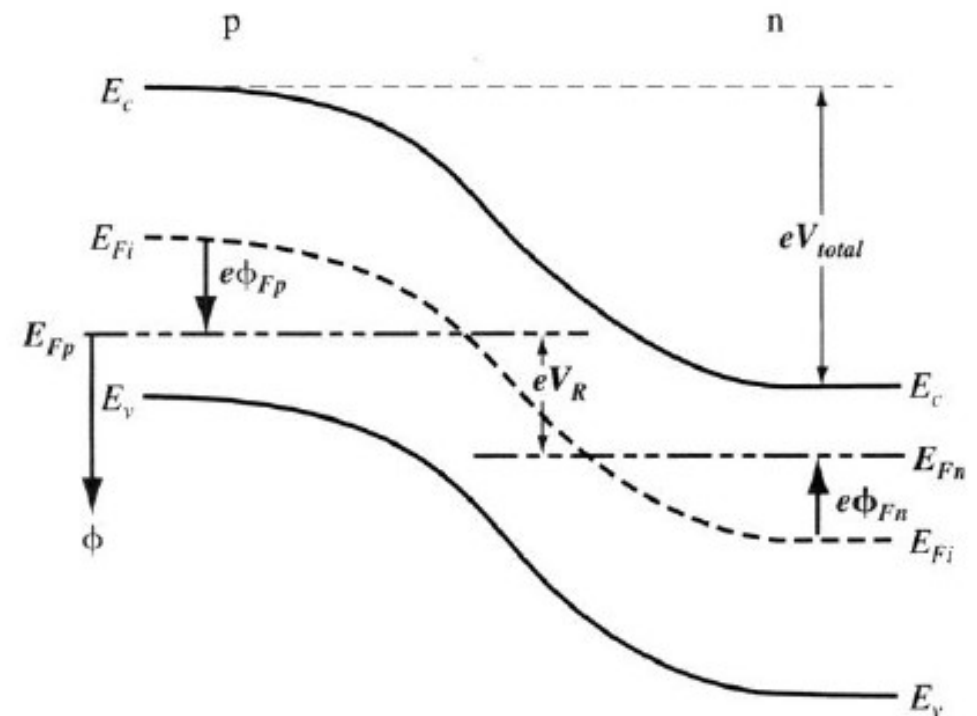
θα έχουμε πλέον
ό στο όλο σύστημα.

ετική τάση στην περιοχή n σε
σχέση με την περιοχή p

Ενεργειακό διάγραμμα επαφής pn
σε θερμική ισορροπία



Ενεργειακό διάγραμμα επαφής pn
υπό ανάστροφη πόλωση

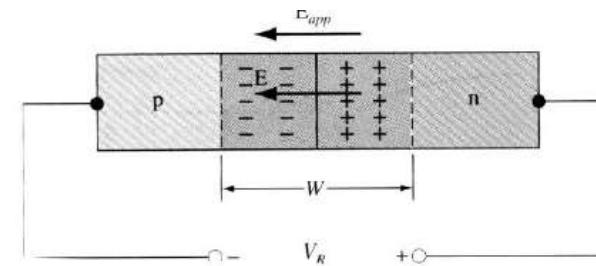
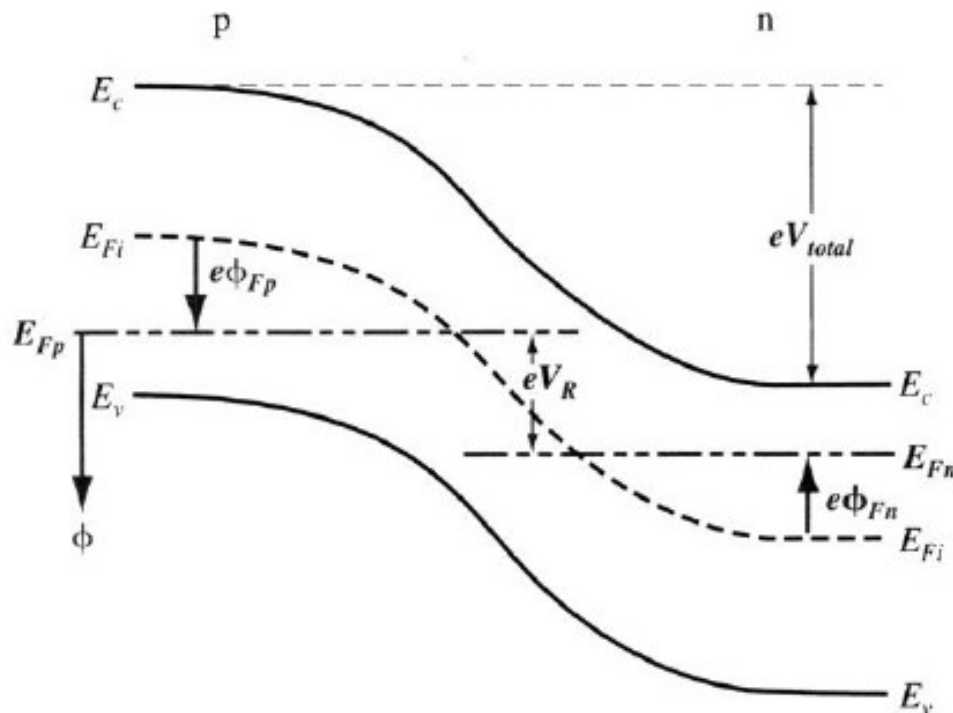


Επαφή pn

Εφαρμογή ανάστροφης τάσης πόλωσης

θετική τάση στην περιοχή n σε
σχέση με την περιοχή p

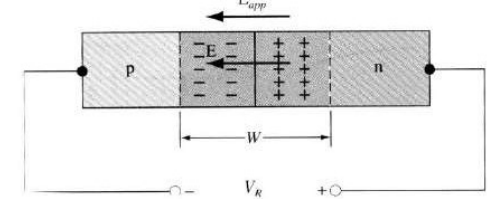
Ενεργειακό διάγραμμα επαφής pn
υπό ανάστροφη πόλωση



Σχήμα 1.8 Η επαφή pn υπό ανάστροφη πόλωση

- Το επίπεδο Fermi στην περιοχή n είναι χαμηλότερα απ' ότι στην περιοχή p, η διαφορά τους ισούται με την εφαρμοζόμενη τάση.

Επαφή pn

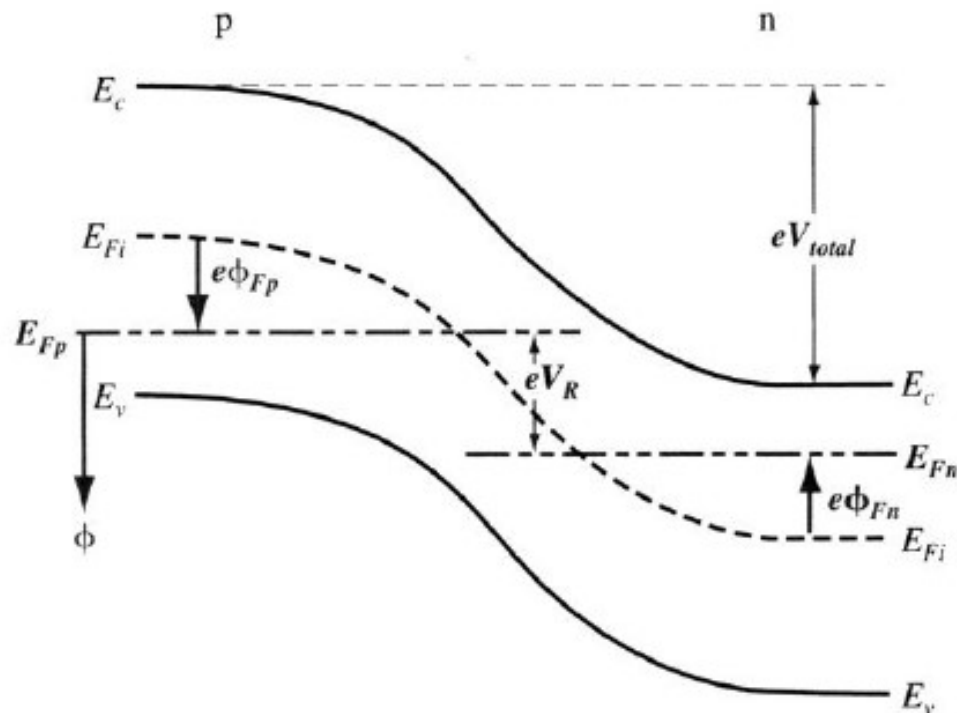


Σχήμα 1.8 Η επαφή pn υπό ανάστροφη πόλωση

Εφαρμογή ανάστροφης τάσης πόλωσης

θετική τάση στην περιοχή n σε σχέση με την περιοχή p

Ενεργειακό διάγραμμα επαφής pn
υπό ανάστροφη πόλωση



➤ Ο ολικός φραγμός δυναμικού V_{Tot} αυξάνεται και θα ισούται με

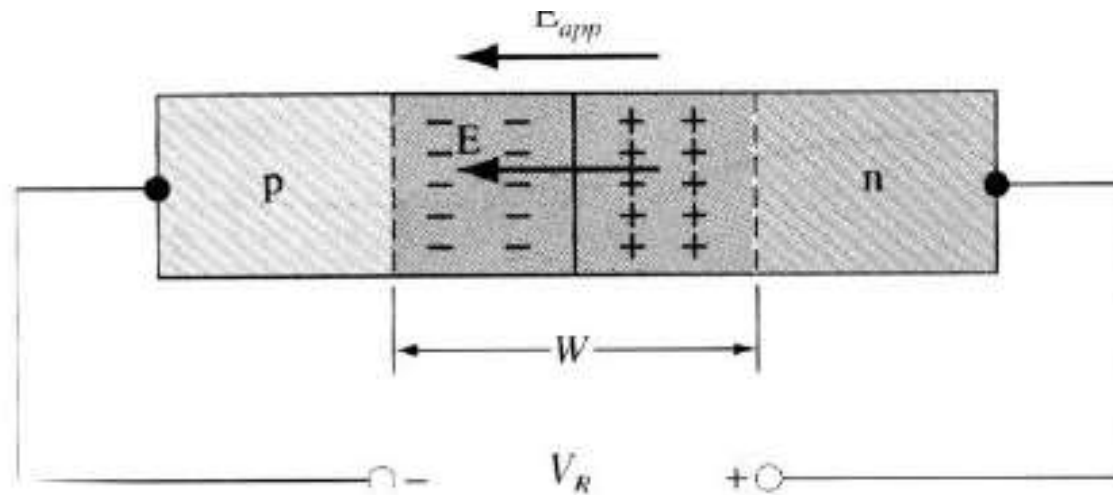
$$V_{total} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}| + V_R$$

$$V_{total} = V_{bi} + V_R$$

όπου V_{bi} το δυναμικό επαφής.

V_R η ανάστροφη πόλωση

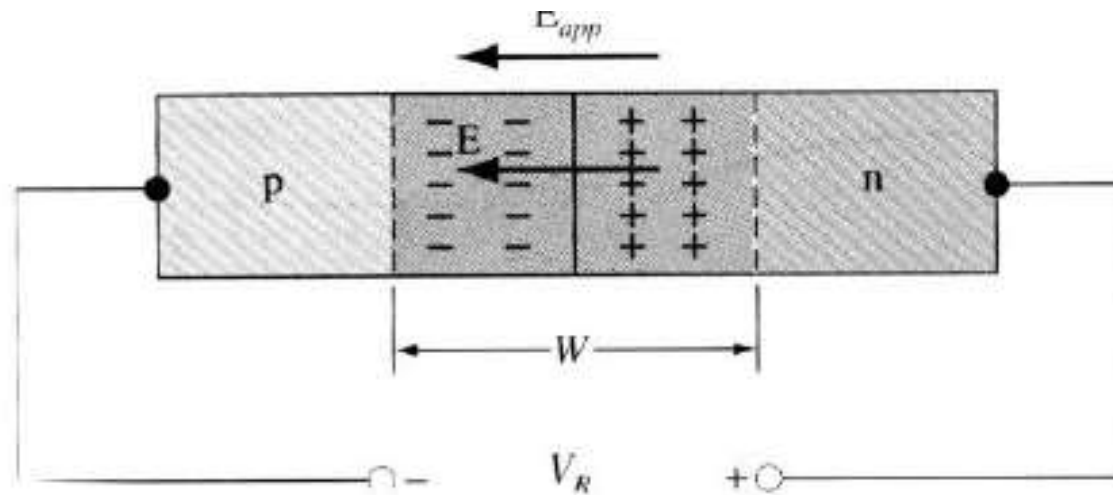
Επαφή pn



Σχήμα 1.8 Η επαφή pn υπό ανάστροφη πόλωση

Εφόσον τα ηλεκτρικά πεδία στις ουδέτερες περιοχές n και p θεωρούμε ότι είναι μηδενικά, το ηλεκτρικό πεδίο της περιοχής φορτίων χώρου θα αυξηθεί λόγω της εφαρμοζόμενης πόλωσης και επομένως θα πρέπει να αυξηθεί και ο αριθμός των θετικών και αρνητικών φορτίων της περιοχής, άρα θα πρέπει να αυξηθεί το πλάτος της περιοχής φορτίων χώρου W .

Επαφή pn



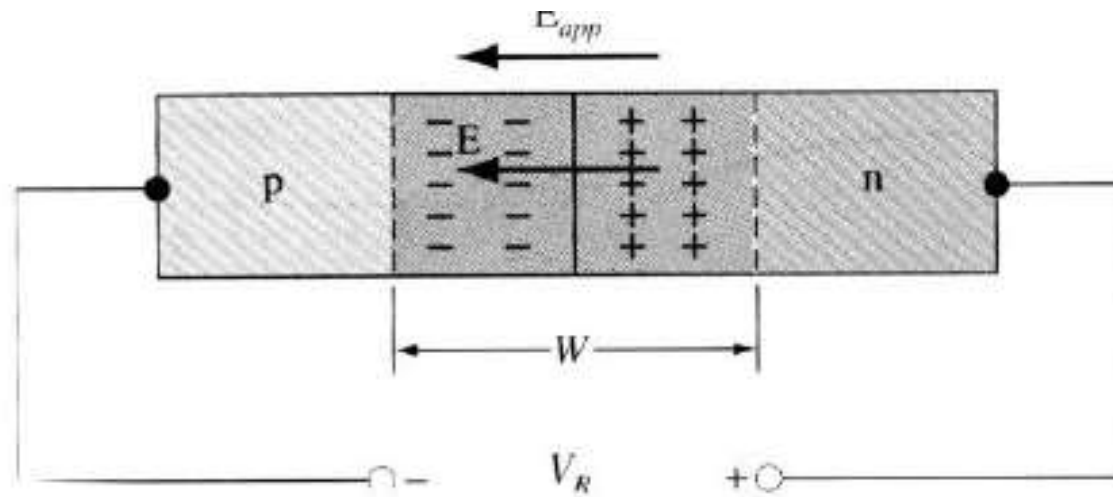
Σχήμα 1.8 Η επαφή pn υπό ανάστροφη πόλωση

Για τον υπολογισμό του **νέου πλάτους W** αρκεί να αντικαταστήσουμε το δυναμικό επαφής με το ολικό δυναμικό σε αυτή τη περίπτωση

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

φαίνεται η αναμενόμενη αύξηση του πλάτους της περιοχής φορτίων χώρου, όταν εφαρμόζεται μία ανάστροφη πόλωση.

Επαφή pn

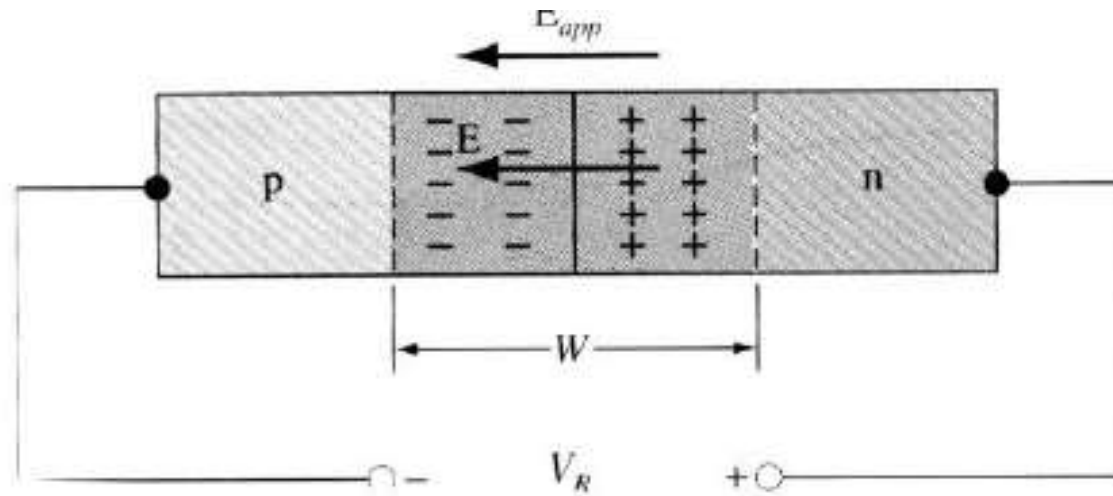


Σχήμα 1.8 Η επαφή pn υπό ανάστροφη πόλωση

$$x_n = \left\{ \frac{2 \epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_a}{N_d} \right] \left[\frac{1}{N_a + N_d} \right] \right\}^{1/2}$$

$$x_p = \left\{ \frac{2 \epsilon_s V_{bi}}{e} \left[\frac{N_d}{N_a} \right] \left[\frac{1}{N_a + N_d} \right] \right\}^{1/2}$$

Επαφή pn



Σχήμα 1.8 Η επαφή pn υπό ανάστροφη πόλωση

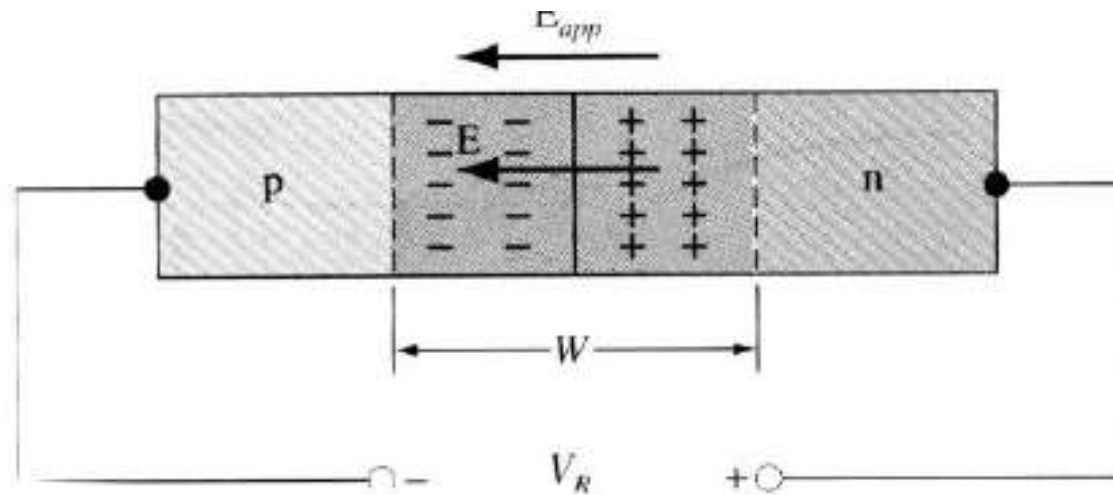
Αντίστοιχα τα x_n και x_p θα υπολογιστούν από τις σχέσεις 1.28 και 1.29, αν αντικατασταθεί το V_{bi} με το $V_{bi} + V_R$.

$$x_n = \left\{ \frac{2 \epsilon_s}{e} \left[\frac{N_a}{N_d} \right] \left[\frac{1}{N_a + N_d} \right] \right\}^{1/2}$$

$$x_p = \left\{ \frac{2 \epsilon_s}{e} \left[\frac{N_d}{N_a} \right] \left[\frac{1}{N_a + N_d} \right] \right\}^{1/2}$$

$$(V_{bi} + V_R)$$

Επαφή pn



Σχήμα 1.8 Η επαφή pn υπό ανάστροφη πόλωση

- Το μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο, στην μεταλλουργική επαφή

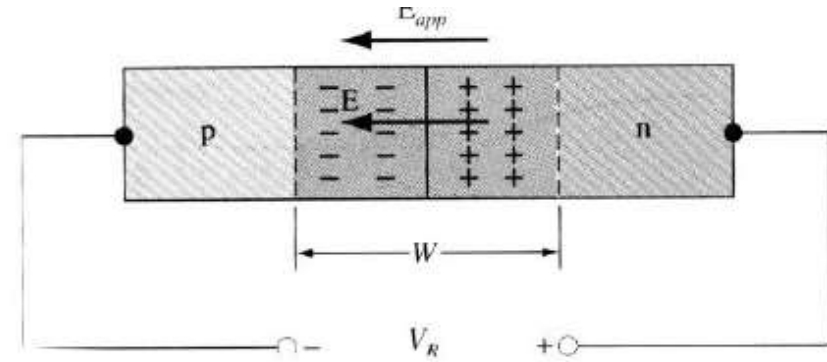
$$E_{\max} = \frac{-eN_d x_n}{\epsilon_s} = \frac{-eN_a x_p}{\epsilon_s}$$

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

$$E_{\max} = - \left\{ \frac{2e(V_{bi} + V_R)}{\epsilon_s} \left(\frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right) \right\}^{1/2}$$

Επαφή pn

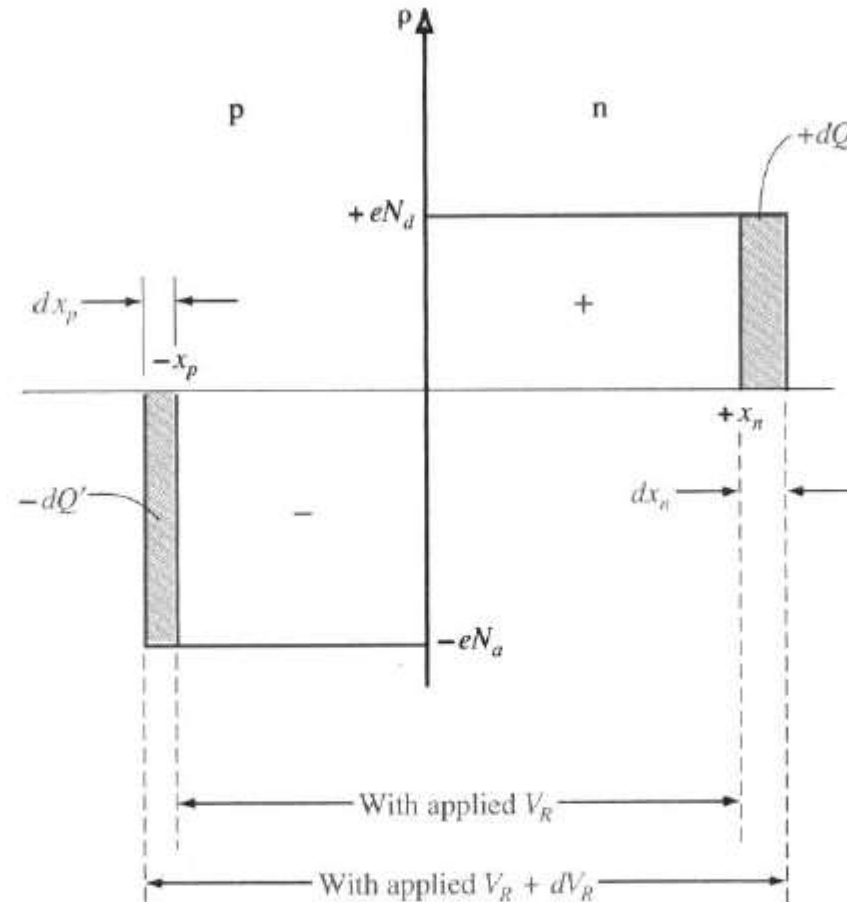
Εφόσον υπάρχει ένας διαχωρισμός αρνητικών και θετικών φορτίων στην περιοχή απογύμνωσης είναι προφανές ότι θα υπάρχει **μία χωρητικότητα που θα χαρακτηρίζει** την επαφή pn.



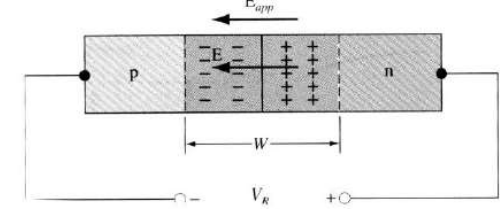
Σχήμα 1.8 Η επαφή pn υπό ανάστροφη πόλωση

Επαφή pn

πυκνότητες
αρνητικού και
θετικού φορτίου στην
περιοχή
απογύμνωσης καθώς
και οι μεταβολές
στην πυκνότητα
θετικού και
αρνητικού φορτίου
(dQ'), όταν η
αρνητική πόλωση
μεταβληθεί από V_R
σε $V_R + dV_R$.



Σχήμα 1.9 Μεταβολή του πλάτους της περιοχής φορτίων χώρου με την μεταβολή της ανάστροφης πόλωσης



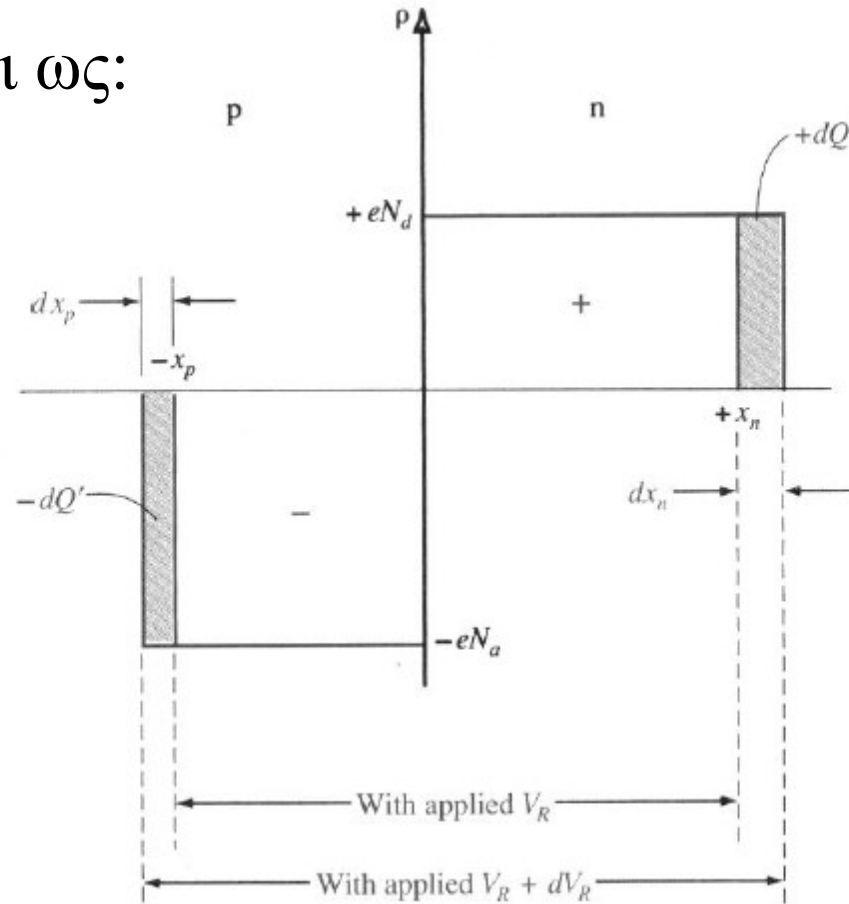
Σχήμα 1.8 Η επαφή pn υπό ανάστροφη πόλωση

Η χωρητικότητα επαφής ορίζεται ως:

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

όπου

$$dQ' = eN_d dx_n = eN_\alpha dx_p$$



Η μεταβολή φορτίου dQ' είναι σε μονάδες Coul/cm² έτσι και η χωρητικότητα C' θα δίνεται σε μονάδες Farads/cm² (χωρητικότητα ανά μονάδα επιφανείας.)

Επαφή pn

Η χωρητικότητα επαφής

$$dQ' = eN_d dx_n = eN_a dx_p$$

$$x_n = \left\{ \frac{2 \epsilon_s (V_{bi} + V_R)}{e} \left[\frac{N_a}{N_d} \right] \left[\frac{1}{N_a + N_d} \right] \right\}^{1/2}$$

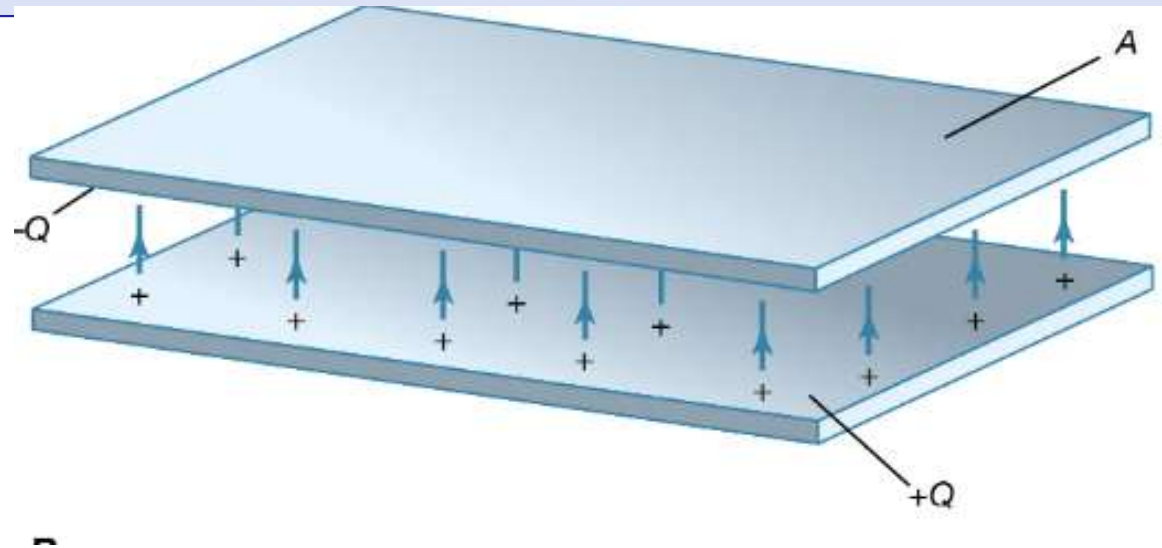
$$C' = \frac{dQ'}{dV_R} = eN_d \frac{dx_n}{dV_R}$$

$$C' = \left\{ \frac{e \epsilon_s N_a N_d}{2(V_{bi} + V_R)(N_a + N_d)} \right\}^{1/2}$$

Η χωρητικότητα επαφής αναφέρεται και ως χωρητικότητα περιοχής απογύμνωσης.

Επαφή pn

$$C' = \frac{\epsilon_s}{W}$$



Η έκφραση 1.43 παρομοιάζει με την χωρητικότητα ανά μονάδα επιφανείας ενός πυκνωτή με παράλληλους επίπεδους οπλισμούς σε απόσταση W . Στην επαφή pn επειδή το W είναι συνάρτηση της εφαρμοζόμενης πόλωσης συνεπάγεται ότι και η χωρητικότητα επαφής θα είναι συνάρτηση της εφαρμοζόμενης πόλωσης.

Επαφή pn

Επαφές μίας πλευράς

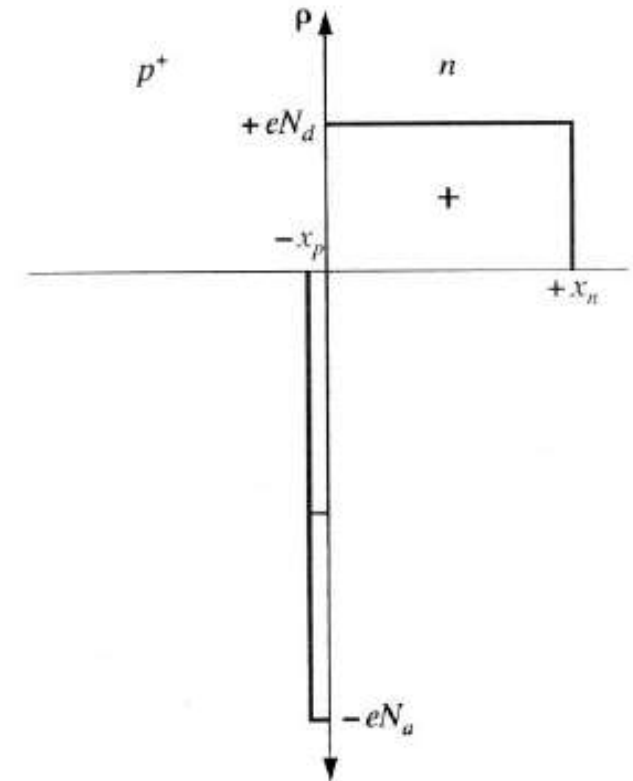
Στην συνέχεια θα μελετήσουμε μια ειδική κατηγορία επαφής pn την λεγόμενη *επαφή μίας πλευράς* (*one-side junction*). Αν για παράδειγμα η περιοχή p έχει πολύ μεγάλη συγκέντρωση προσμίξεων σε σχέση με την περιοχή n δηλ. $N_a \gg N_d$ αυτή η επαφή αναφέρεται ως p⁺n επαφή.

$$W \approx \left\{ \frac{2 \epsilon_s (V_{bi} + V_R)}{e N_d} \right\}^{1/2}$$

και

$$x_p \ll x_n$$

$$W \approx x_n$$



Σχήμα 1.10 Πυκνότητα φορτίων χώρου επαφής p⁺n

Επαφή pn

Επαφές μίας πλευράς

Η χωρητικότητα επαφής σε αυτή τη περίπτωση θα γίνει:

$$C' \approx \left\{ \frac{e \epsilon_s N_d}{2(V_{bi} + V_R)} \right\}^{1/2}$$

- Παρατηρούμε ότι η χωρητικότητα επαφής μιας επαφής p+n είναι συνάρτηση μόνο της συγκέντρωσης προσμίξεων της επαφής n που έχει την μικρότερη συγκέντρωση.

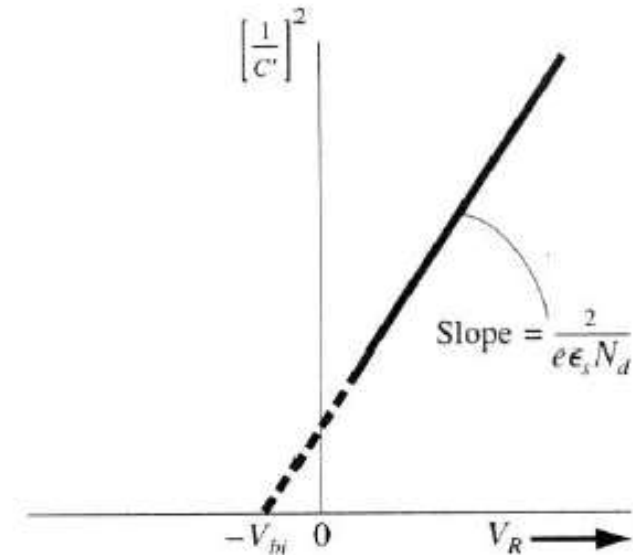
$$\left(\frac{1}{C'} \right)^2 = \frac{2(V_{bi} + V_R)}{e \epsilon_s N_d}$$

Επαφή pn

Επαφές μίας πλευράς

$$\left(\frac{1}{C'}\right)^2 = \frac{2(V_{bi} + V_R)}{e \epsilon_s N_d}$$

$\left(\frac{1}{C'}\right)^2$ είναι γραμμική συνάρτηση της εφαρμοζόμενης ανάστροφης τάσης πόλωσης



Σχήμα 1.11 Γραφική παράσταση $(1/C^2)$ συναρτήσει του V_R

- Το δυναμικό επαφής μπορεί να υπολογιστεί για $V_R = 0$,
- Από την κλίση της ευθείας μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση προσμίξεων N_d .

Έτσι οι επαφές μιας πλευράς είναι πολύ χρήσιμες για τον πειραματικό προσδιορισμό συγκέντρωσης προσμίξεων και δυναμικού επαφής.