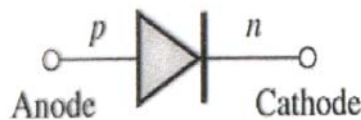
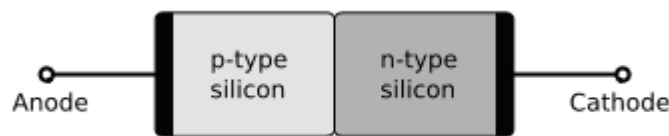


ΔΙΟΔΟΣ ΕΠΑΦΗΣ P-N

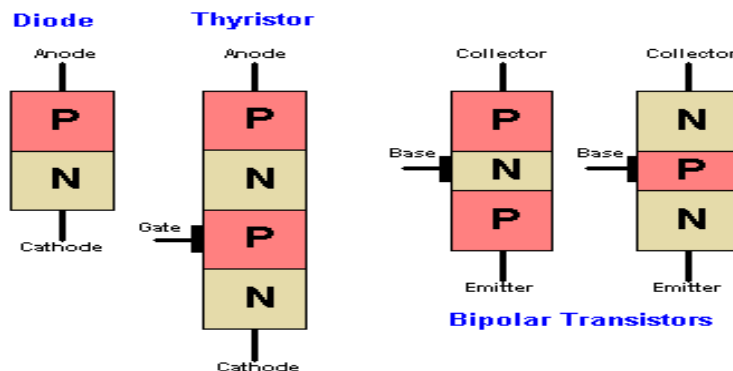
Εισαγωγή

- Η δίοδος επαφής p-n υπάρχει στη δομή όλων των κυκλωματικών στοιχείων που κατασκευάζονται από ημιαγωγούς
- Είναι το απλούστερο και θεμελιώδες μη γραμμικό κυκλωματικό στοιχείο
- Χρησιμοποιείται σε ηλεκτρονικές εφαρμογές
- Η συστηματική μελέτη και κατανόηση της λειτουργίας της είναι βασική για την κατανόηση πιο πολύπλοκων κυκλωματικών στοιχείων



Δίοδος επαφής p-n

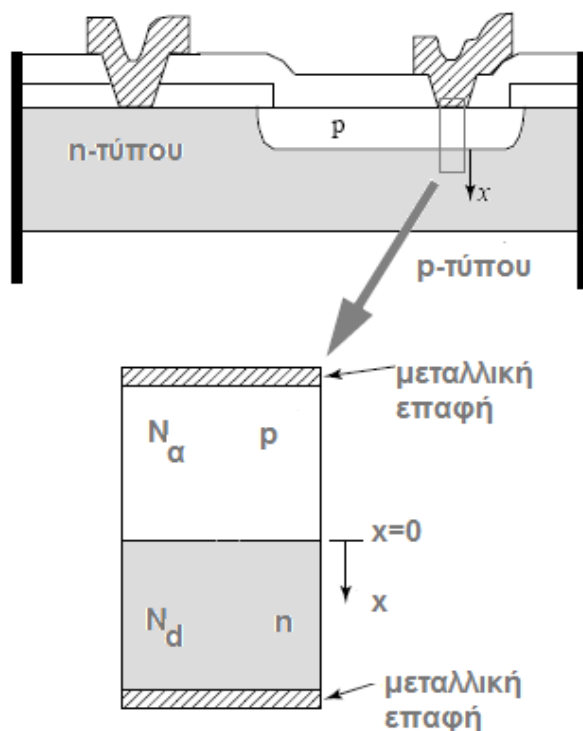
From Computer Desktop Encyclopedia
© 2008 The Computer Language Co., Inc.



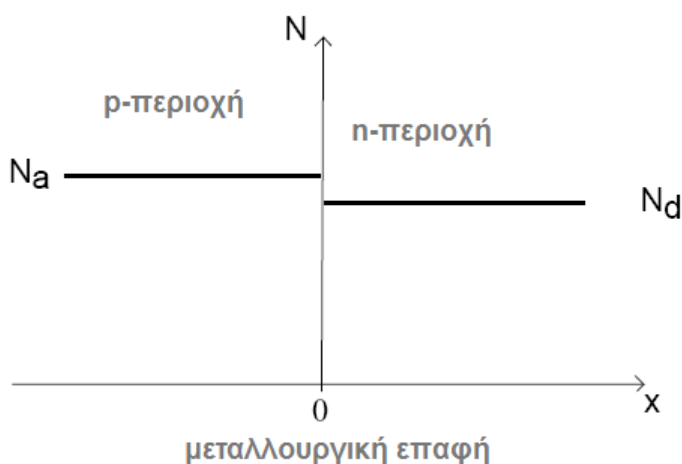
Επαφές P-N

Ηλεκτροστατικά μεγέθη επαφής pn σε θερμική ισορροπία

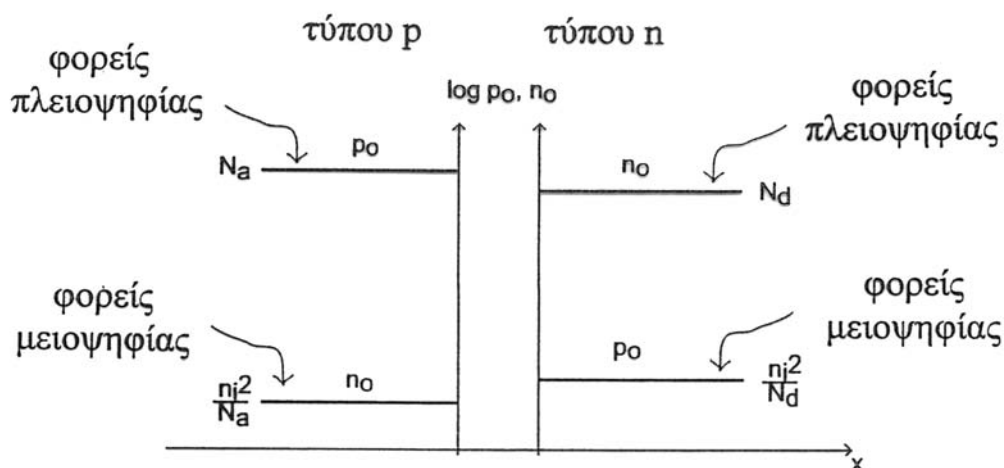
Η επαφή pn σχηματίζεται με διάχυση προσμίξεων στον ημιαγωγό, όταν η επιφάνειά του εκτίθεται σε πηγή μεγάλης συγκέντρωσης προσμίξεων αντίθετου τύπου από εκείνες που ήδη υπάρχουν (είναι ομοεπαφή γιατί οι δύο πλευρές p και n είναι ίδιο υλικό).



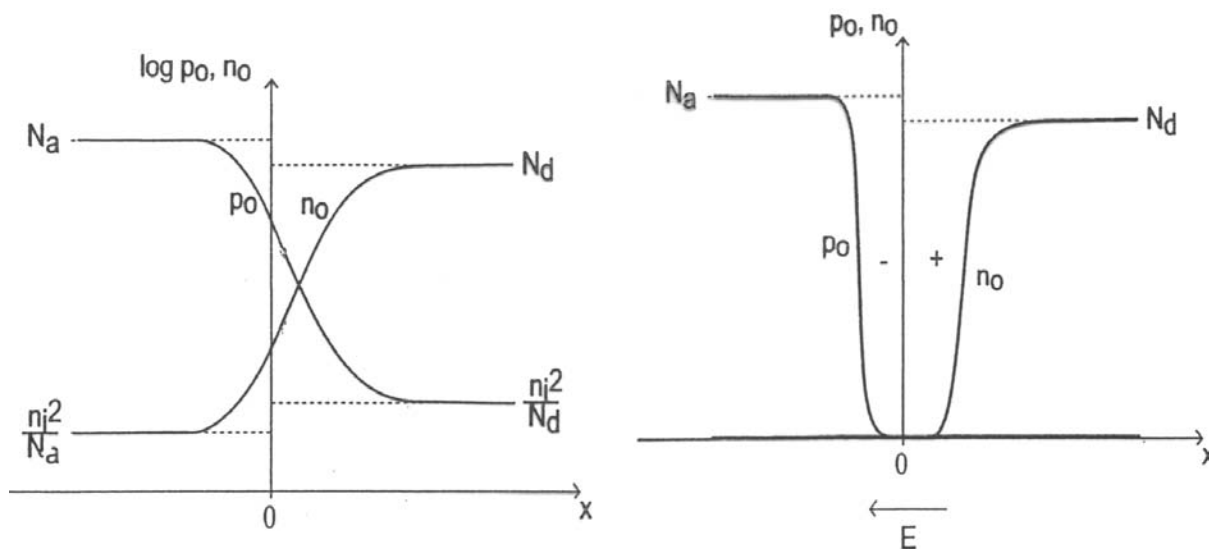
Απότομη επαφή p-n: σταθερή συγκέντρωση προσμίξεων αποδεκτών N_a στη περιοχή τύπου p, δοτών N_d στην περιοχή τύπου n σε ημιαγωγικό μονοκρύσταλλο



1. Ημιαγωγός τύπου p & ημιαγωγός τύπου n με ομοιόμορφη συγκέντρωση προσμίξεων, πριν την ένωση
 Κατανομή της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων - οπών σε λογαριθμική κλίμακα



2. Κατανομή της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων-οπών στην απότομη επαφή p-n σε θερμική ισορροπία σε : α) λογαριθμική κλίμακα β) γραμμική κλίμακα

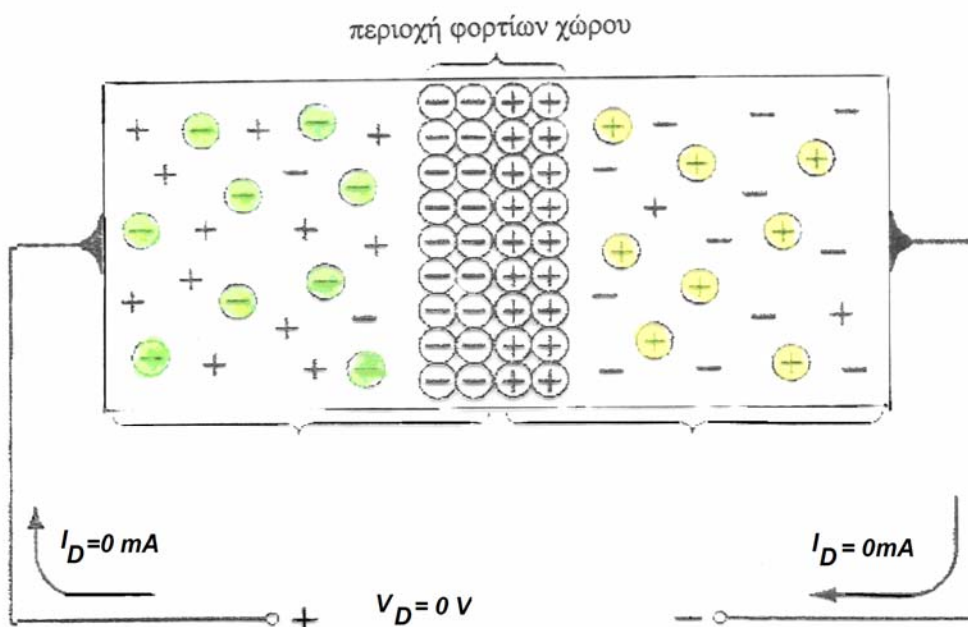


$$N_a = p_0 \quad N_d = n_0 \quad n_0 p_0 = n_i^2$$

Η αρχή του άξονα x τοποθετείται στη μεταλλουργική επαφή (και όχι στην επιφάνεια της πλευράς τύπου p), οπότε η πλευρά p της επαφής είναι στο αρνητικό τμήμα του άξονα x

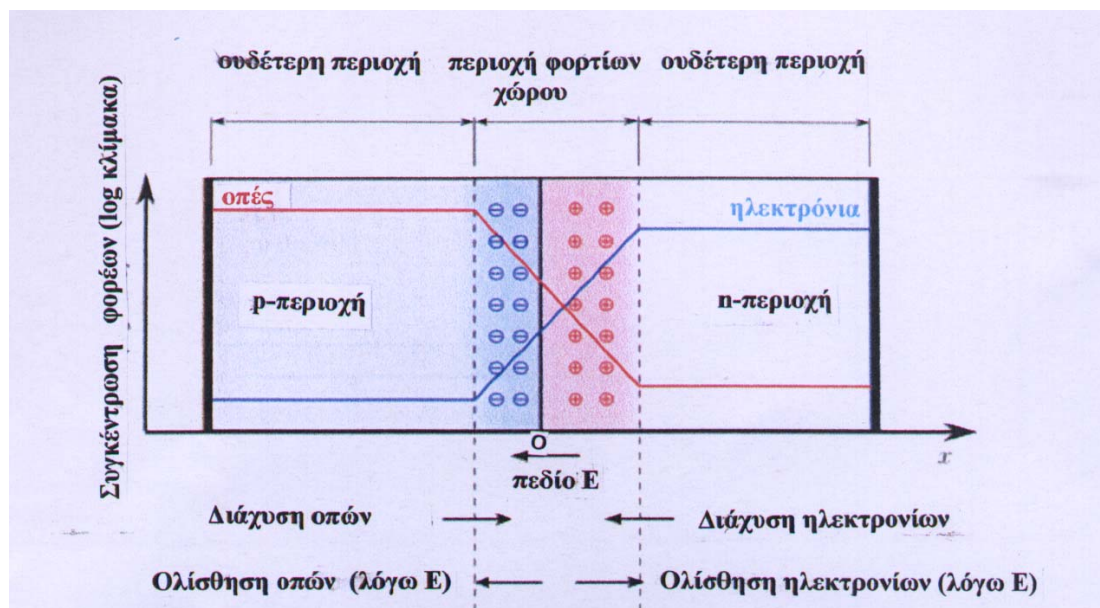
Απότομη επαφή pn σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος

Περιοχή φορτίων χώρου η άντλησης στην απότομη επαφή pn σε θερμική ισορροπία



1. Ηλεκτρόνια από την περιοχή τύπου n διαχέονται προς την περιοχή τύπου p
2. Οπές από την περιοχή τύπου p διαχέονται προς την περιοχή τύπου n
3. Τα ηλεκτρόνια ενώνονται με τις οπές (ανασύζευξη) εκατέρωθεν της επαφής, οπότε εξαφανίζονται.
4. Δημιουργούνται δύο λεπτές ζώνες με ακίνητα φορτία :
Θετικά των ιονισμένων δοτών στην περιοχή τύπου n και αρνητικά των ιονισμένων αποδεκτών στην περιοχή τύπου p.

Περιοχή φορτίων χώρου στην απότομη επαφή p-n σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας (εξωτερική τάση πόλωσης ίση με το μηδέν)



- Επαφή p-n:** 1. οι περιοχές με τα θετικά (κόκκινο) και αρνητικά (μπλε) φορτία, οι ουδέτερες (γκρι) περιοχές, το ηλεκτρικό πεδίο E.
 2. Οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και οπών παριστάνονται με γαλάζια και κόκκινη γραμμή.
 3. Η κατεύθυνση διάχυσης και ολίσθησης για τα ηλεκτρόνια και τις οπές.

1. Η περιοχή με τα φορτία είναι κενή από ελεύθερους φορείς, ονομάζεται περιοχή φορτίων χώρου (space charge region) ή περιοχή άντλησης (depletion layer) ή μεταβατική (transition region)

2. Τα φορτισμένα στρώματα προκαλούν ένα ηλεκτρικό πεδίο E με κατεύθυνση από την πλευρά n στην p (αρνητικό), ώστε να εμποδιστεί η διάχυση των φορέων πλειοψηφίας, δηλαδή εκκενώνει την επαφή.

3. Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος ($V_D=0V$) δεν υπάρχει καμία καθαρή ροή ρεύματος στην επαφή p-n: οι ροές του ρεύματος ολίσθησης και διάχυσης είναι ίσες για αμφοτέρους τους φορείς

$$J_e(\text{drift}) + J_e(\text{diffusion}) = 0$$

$$J_h(\text{drift}) + J_h(\text{diffusion}) = 0$$

Ο ημιαγωγός μπορεί να χωρισθεί σε 3 περιοχές :

- 2 σχεδόν-ουδέτερες περιοχές n και p και 1 περιοχή φορτίων χώρου

Ερώτημα : Πώς θα υπολογίσουμε τη χωρική πυκνότητα φορτίου $\rho(x)$, τα ηλεκτροστατικά μεγέθη $E(x)$ και $\Psi(x)$ στην περιοχή φορτίων χώρου;

Υπολογισμός των ηλεκτροστατικών μεγεθών: ηλεκτρικό πεδίο $E(x)$ και δυναμικό $\Psi(x)$ στην περιοχή φορτίων χώρου

Το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο δημιουργεί ένα ηλεκτροστατικό δυναμικό
Για την εύρεση αναλυτικών λύσεων απλοποιούμε το πρόβλημα σε μία διάσταση

$E(x)$ και $\Psi(x)$ στην περιοχή φορτίων χώρου υπολογίζονται από την κατανομή φορτίου και την εξίσωση του Poisson σε μία διάσταση

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{dE(x)}{dx} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0}$$

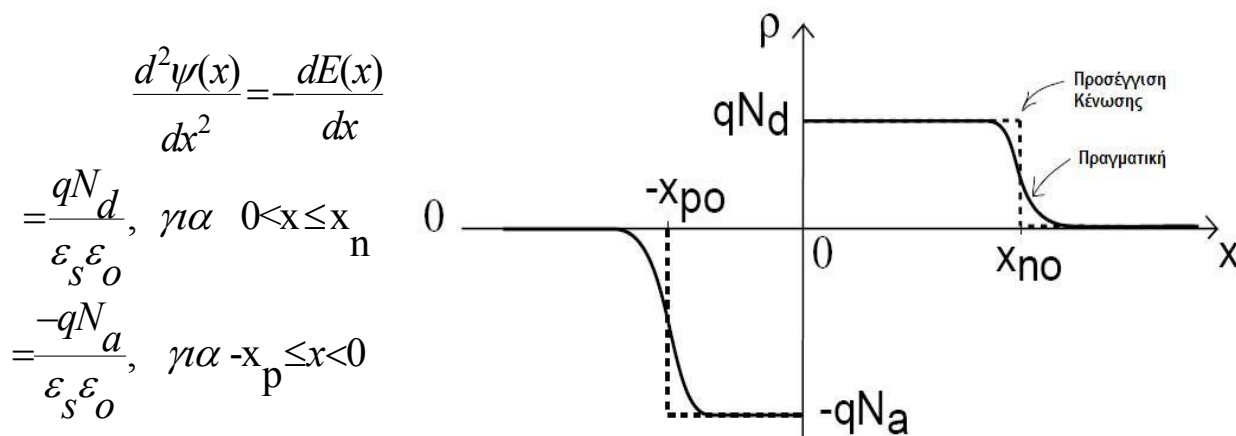
$\rho(x)$ είναι η πυκνότητα φορτίου (C/cm^3), ϵ η ηλεκτρική διαπερατότητα του ημιαγωγού και ϵ_s η διηλεκτρική σταθερά του. ϵ_0 η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού

Προσέγγιση της περιοχής άντλησης ή κένωσης (depletion approximation):

1. στις ουδέτερες περιοχές με προσέγγιση $\rho(x)=0$
2. στην περιοχή άντλησης με προσέγγιση $\rho(x)=-qN_a$ στην πλευρά p και $\rho(x)=qN_d$ στην πλευρά n
3. Απότομη μετάβαση από την ουδέτερη περιοχή στην περιοχή άντλησης

κατανομή του $\rho(x)$ στην περιοχή φορτίων χώρου φαίνεται στο σχήμα (όλες οι προσμίξεις είναι ιονισμένες)

$$N_d^+ = N_d, \quad N_a^- = N_a$$



Υπολογισμός του ηλεκτρικού πεδίου $E(x)$

Ολοκληρώνουμε την εξίσωση του Gauss:

$$E(x_2) - E(x_1) = \frac{1}{\epsilon_s \epsilon_0} \int_{x_1}^{x_2} \rho(x) dx$$

$$x \leq -x_p \quad E(x) = E(-x_p) = 0 \quad \text{και} \quad x_n \leq x \quad E(x) = E(x_n) = 0$$

$$-x_p \leq x < 0 \quad E(x) - E(-x_p) = \frac{1}{\epsilon_s \epsilon_0} \int_{-x_p}^x -qN_a dx = \frac{-qN_a}{\epsilon_s \epsilon_0} (x + x_p)$$

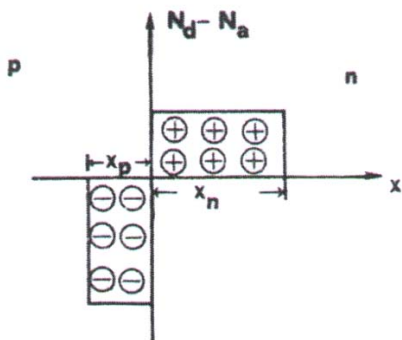
$$0 < x \leq x_n \quad E(x) = -\frac{qN_d}{\epsilon_s \epsilon_0} (x_n - x)$$

x_n, x_p το εύρος της περιοχής άντλησης στην πλευρά τύπου n, p

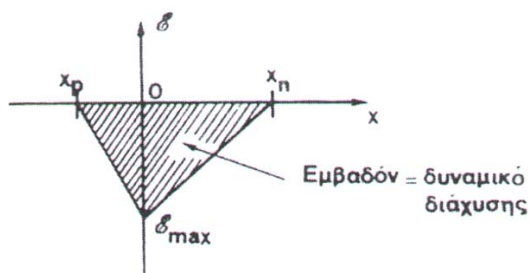
Μέγιστη τιμή έντασης ηλεκτροστατικού πεδίου E_{\max} (στη θέση $x = 0$):

$$|E_{\max}| = \frac{qN_d x_n}{\epsilon_s \epsilon_0} = \frac{qN_a x_p}{\epsilon_s \epsilon_0}$$

$$N_d \cdot x_n = N_a \cdot x_p$$



(α)



(β)

Γραμμική εξάρτηση του $E(x)$ από την απόσταση

Υπολογισμός του δυναμικού επαφής V_{bi}

Υπολογίζουμε τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις ουδέτερες περιοχές n και p, γνωστή ως **δυναμικό επαφής ή εσωτερικό δυναμικό V_{bi}**

Το ηλεκτροστατικά δυναμικά Ψ_n, Ψ_p στις ουδέτερες περιοχές τύπου n και p προκύπτουν θεωρώντας το $E_F = 0$ δυναμικό αναφοράς

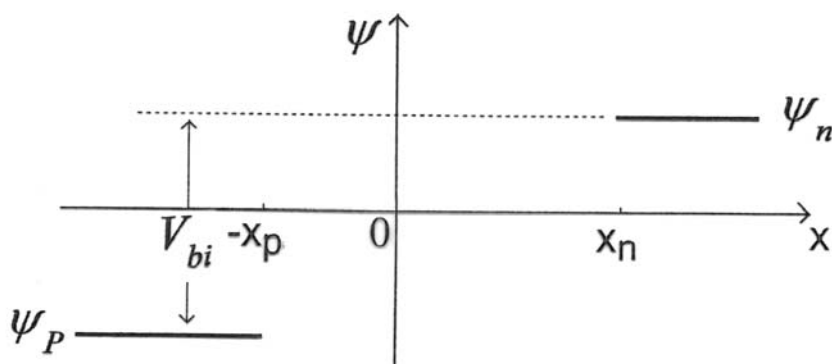
$$n_0 = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) = n_i \exp\left(\frac{q\Psi_n}{kT}\right), \quad p_0 = n_i \exp\left(\frac{-q\Psi_p}{kT}\right), \quad \text{όπου } \Psi = -\frac{E_i}{q} \Rightarrow$$

$$\psi_n = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_0}{n_i} \quad \psi_p = -\frac{kT}{q} \ln \frac{p_0}{n_i} \quad \text{σχέσεις Boltzmann}$$

Στις ουδέτερες περιοχές p και n, τα p_0 και n_0 είναι γνωστά \Rightarrow μπορεί να υπολογιστούν τα δυναμικά

$$\text{Στην p-περιοχή } p_0 = N_a \Rightarrow \psi_p = -V_T \ln \frac{N_a}{n_i}$$

$$\text{Στην n-περιοχή } n_0 = N_d \Rightarrow \psi_n = V_T \ln \frac{N_d}{n_i}, \quad \text{όπου } V_T = \frac{kT}{q}$$



Το δυναμικό επαφής V_{bi} :

$$V_{bi} = \psi_n - \psi_p = V_T \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right) = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right)$$

Η σχέση είναι γενική: ανάμεσα σε δύο διαφορετικά υλικά υπάρχει πάντα διαφορά δυναμικού

- Το φράγμα δυναμικού επαφής V_{bi} εμποδίζει τη διάχυση των φορέων πλειοψηφίας δια μέσου της επαφής και διατηρεί την θερμική ισορροπία

Υπολογισμός της κατανομής του ηλεκτροστατικού δυναμικού $\psi(x)$

Το ηλεκτροστατικό δυναμικό δίνεται από τη σχέση

$$\psi(x) = -\int E(x)dx, \quad \psi(x_2) - \psi(x_1) = -\int_{x_1}^{x_2} E(x)dx$$

- $-x \leq x_p$ $\psi(x) = \psi_p = -V_T \ln \frac{N_a}{n_i}$
- $-x_p \leq x < 0$ $\psi(x) - \psi(-x_p) = \int_{-x_p}^x -E(x)dx = -\int_{-x_p}^x \frac{-qN_a}{\epsilon_s \epsilon_o} (x+x_p) dx$

$$\psi(x) = \psi_p + \frac{qN_a}{2\epsilon_s \epsilon_o} (x+x_p)^2$$
- $0 < x \leq x_n$ $\psi(x) = \psi_n - \frac{qN_d}{2\epsilon_s \epsilon_o} (x_n - x)^2$
- $x_n \leq x$ $\psi(x) = \psi_n = V_T \ln \frac{N_d}{n_i}$

Δεν γνωρίζουμε όμως τα x_n , $x_p \Rightarrow$ χρειαζόμαστε δύο επιπλέον εξισώσεις

1. συνολική ηλεκτρική ουδετερότητα

$$qN_a x_p = qN_d x_n$$

2. $\psi(x)$ συνεχής στο $x=0$, δηλαδή $\psi_p(0) = \psi_n(0)$

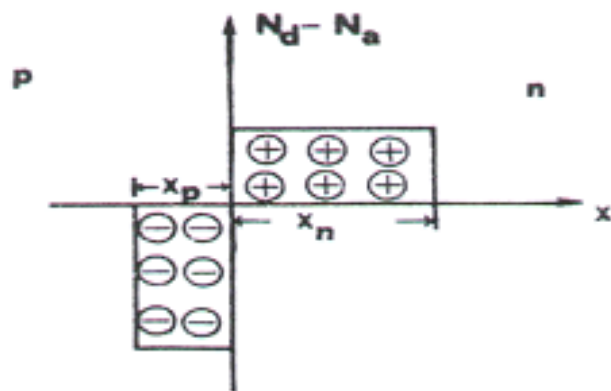
$$\psi_p + \frac{qN_a}{2\epsilon_s \epsilon_o} (0+x_p)^2 = \psi_n - \frac{qN_d}{2\epsilon_s \epsilon_o} (x_n - 0)^2 = \psi_n - \frac{qN_d}{2\epsilon_s \epsilon_o} \left(\frac{N_a x_p}{N_d}\right)^2 \Rightarrow$$

Λύνοντας ως προς x_p και με αντικατάσταση του $V_{bi} = \psi_n - \psi_p$ προκύπτει:

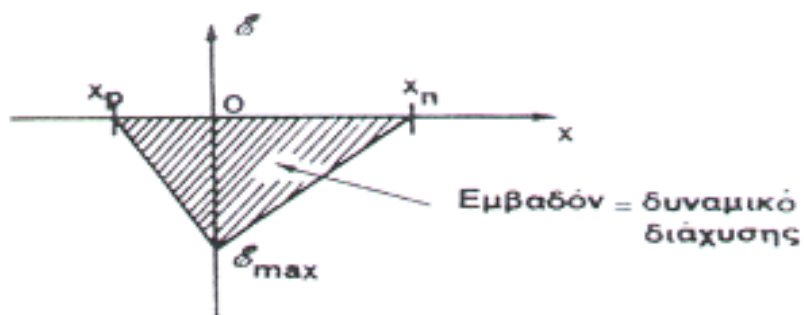
$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_o V_{bi} N_a}{q(N_a + N_d)N_d}} \quad x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_o V_{bi} N_d}{q(N_a + N_d)N_a}}$$

x_n , x_p περιοχές άντλησης στις πλευρές τύπου n και p της επαφής

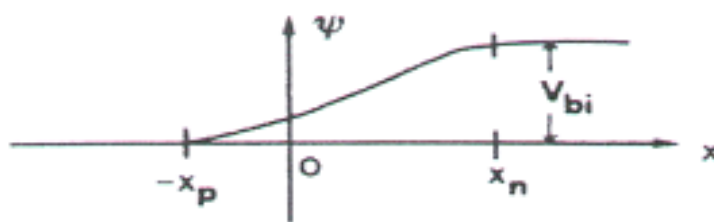
Βλέπε την κατανομή του ηλεκτροστατικού δυναμικού $\psi(x)$ στο παρακάτω σχήμα



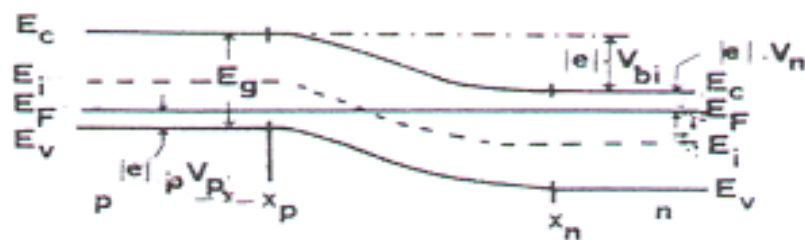
(α)



(β)



(γ)



(δ)

Απότομη επαφή pn σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας (Για $V=0$) :

α) κατανομή φορτίων χώρου,

β) κατανομή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου,

γ) κατανομή του ηλεκτροστατικού δυναμικού,

δ) ενεργειακό διάγραμμα της επαφής pn. Για $V=0$ η στάθμη της ενέργειας Fermi είναι σταθερή στις περιοχές p και n, και το V_{bi} διατηρεί την θερμική ισορροπία.

- **Ολικό εύρος w της περιοχής φορτίων χώρου**

$$w = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_o V_{bi}(N_a + N_d)}{qN_a N_d}}$$

- **Μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο**

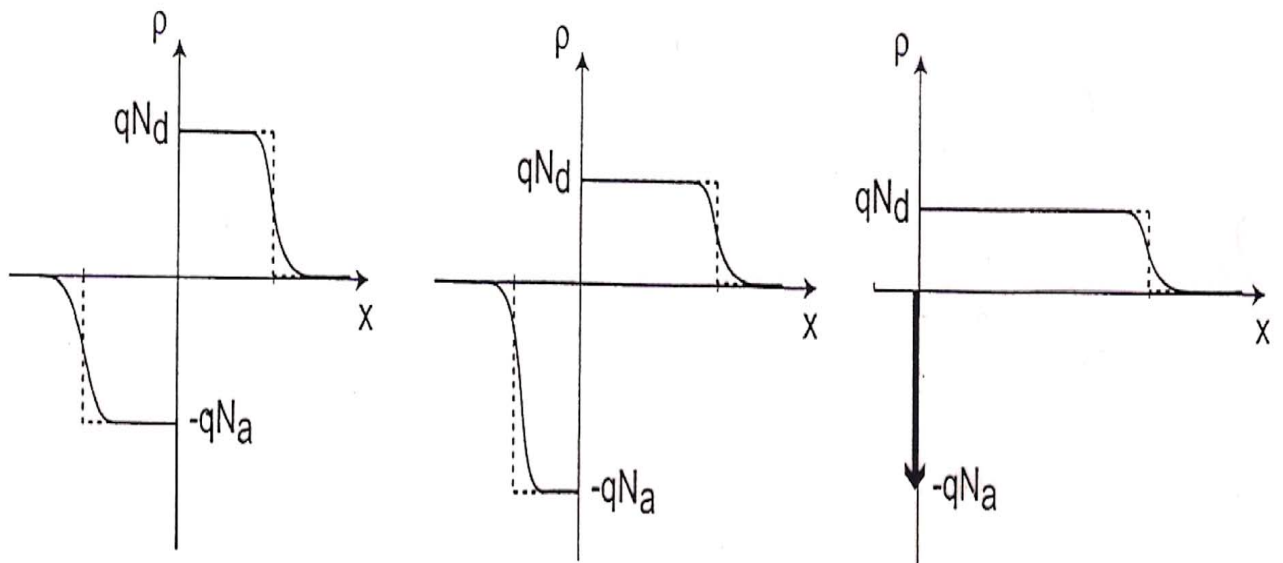
$$|E_{\max}| = \sqrt{\frac{2qV_{bi}N_a N_d}{\varepsilon_s\varepsilon_o(N_a + N_d)}}$$

- Τρεις περιπτώσεις :
1. Συμμετρική επαφή $N_a = N_d \Rightarrow x_p = x_n$
 2. Ασύμμετρη επαφή $N_a > N_d \Rightarrow x_p < x_n$
 3. Έντονα ασύμμετρη επαφή (μονόπλευρη) p^+n
 $N_a \gg N_d \Rightarrow x_p \ll x_n$

Στην ειδική περίπτωση μιας μονόπλευρης απότομης επαφής p^+n ή n^+p , όπου $N_a \gg N_d$ ή $N_d \gg N_a$, αντίστοιχα, το W είναι:

$$W = \left[\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_o \cdot V_{bi}}{qN} \right]^{1/2} \propto \frac{1}{\sqrt{N}}$$

όπου $N = N_d$ ή $N = N_a$ για τις επαφές p^+n και n^+p , αντίστοιχα.



1. Συμμετρική επαφή pn 2. Ασύμμετρη επαφή pn , 3. Μονόπλευρη επαφή p^+n

1. Παράδειγμα υπολογισμού του δυναμικού επαφής V_{bi}

Να υπολογίσετε το V_{bi} στους 300K για μία επαφή πυριτίου με συγκέντρωση προσμίξεων $N_a = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ και $N_d = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Δίνεται ότι $n_i = 1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Λύση

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right) = (0,0259) \ln\left[\frac{(10^{18})(10^{15})}{(1,5 \times 10^{10})^2}\right] = 0,754 \text{ V}$$

Αν αλλάξουμε τη συγκέντρωση των αποδεκτών από $N_a = 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ σε $N_a = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, αλλά διατηρήσουμε τις τιμές των άλλων παραμέτρων σταθερές, η τιμή του V_{bi} παίρνει την τιμή $V_{bi} = 0,635 \text{ V}$.

Παρατήρηση

Το δυναμικό επαφής ή δυναμικό διάχυσης V_{bi} αλλάζει πολύ λίγο καθώς η συγκέντρωση των προσμίξεων αλλάζει κατά πολλές τάξεις μεγέθους, λόγω της λογαριθμικής εξάρτησης.

2. Παράδειγμα υπολογισμού του εύρους της περιοχής φορτίων χώρου w

Να υπολογίσετε το εύρος της περιοχής φορτίων χώρου (ή άντλησης) w για την επαφή στο παράδειγμα 1.

Λύση

$$W = \left[\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_o}{q} \cdot \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \cdot V_{bi} \right]^{1/2} = \left[\frac{2 \cdot (11,7)(8,85 \times 10^{-14})}{1,6 \times 10^{-19}} \cdot \left(\frac{10^{16} + 10^{15}}{10^{16} \times 10^{15}} \right) \cdot 0,635 \right]^{1/2}$$

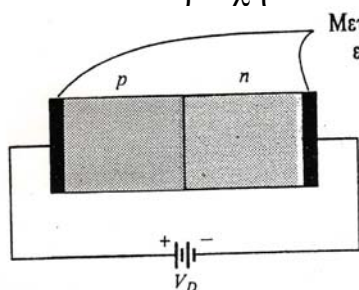
$$= 0,951 \times 10^{-4} \text{ cm} = 0,951 \mu\text{m}$$

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_o V_{bi} N_a}{q(N_a + N_d)N_d}} = 0,864 \mu\text{m}, \quad x_p = 0,951 - 0,864 = 0,086 \mu\text{m} \Rightarrow x_n \gg x_p$$

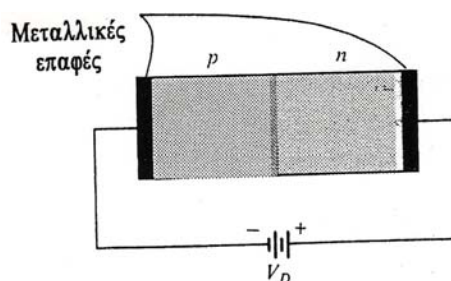
$$|E_{\max}| = \frac{qN_d x_n}{\varepsilon_s \varepsilon_o} = \frac{-(1,6 \times 10^{-19})(10^{15})(0,864 \times 10^{-4})}{(11,7)(8,85 \times 10^{-14})} = 1,34 \times 10^4 \text{ V/cm}$$

ΠΟΛΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΑΦΗΣ PN

1. ορθή πόλωση: Το θετικό δυναμικό στην p-τύπου περιοχή και το αρνητικό στην n-τύπου περιοχή
2. ανάστροφη πόλωση: Το αρνητικό δυναμικό στην p-τύπου περιοχή και το θετικό στην n-τύπου περιοχή



1. Ορθή πόλωση $V > 0$



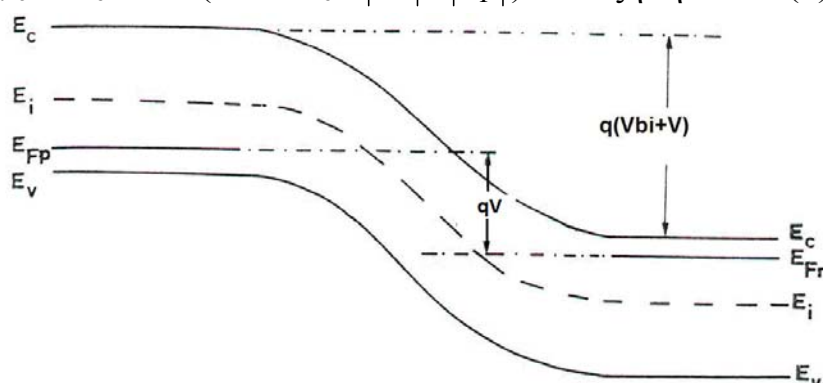
2. Ανάστροφη πόλωση $V < 0$

- Ανάστροφη πόλωση $V < 0$

Ηλεκτροστατικό δυναμικό επαφής p-n

Η διαφορά του ηλεκτροστατικού δυναμικού ανάμεσα στις ουδέτερες περιοχές της επαφής αυξάνει κατά V

$V_{ολικό} = V_{bi} + V$ (όπου $V_{bi} = |\Psi_n| + |\Psi_p|$) \Rightarrow αύξηση του $E(x) \Rightarrow$ αύξηση του W



Ενεργειακό διάγραμμα μια απότομης επαφής p-n κάτω από συνθήκες ανάστροφης πόλωσης

- Ορθή πόλωση $V > 0$

Η διαφορά του ηλεκτροστατικού δυναμικού ανάμεσα στις ουδέτερες περιοχές της επαφής μειώνεται κατά V

$V_{ολικό} = V_{bi} - V$ (όπου $V_{bi} = |\Psi_n| + |\Psi_p|$) \Rightarrow μείωση του $E(x) \Rightarrow$ μείωση του W

Παραδοχή: Η διαφορά δυναμικού (πτώση τάσης) εμφανίζεται μόνο στην περιοχή άντλησης της επαφής pn. Μηδενική πτώση τάσης στις ουδέτερες περιοχές και στις επαφές μεταξύ των επιμεταλλώσεων και των ουδέτερων περιοχών

Αναλυτικές σχέσεις για τα ηλεκτροστατικά μεγέθη: εύρος περιοχής φορτίων χώρου, ηλεκτρικό πεδίο επαφής p-n σε εξωτερική τάση V

παρόμοιες με αυτές σε θερμική ισορροπία

$$V_{bi} \rightarrow V_{bi} - V \quad \text{όπου } V < 0 \text{ ή } V > 0 \Rightarrow$$

$$V_{ολικό} = V_{bi} - V \quad \text{για } V > 0$$

$$V_{ολικό} = V_{bi} + V \quad \text{για } V < 0$$

Περιοχές εκκένωσης στις πλευρές τύπου n και p

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_o (V_{bi} - V) N_a}{q(N_a + N_d) N_d}} \quad x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_o (V_{bi} - V) N_d}{q(N_a + N_d) N_a}}$$

Εύρος περιοχής φορτίων χώρου

$$w = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_o (V_{bi} - V) (N_a + N_d)}{q N_a N_d}}$$

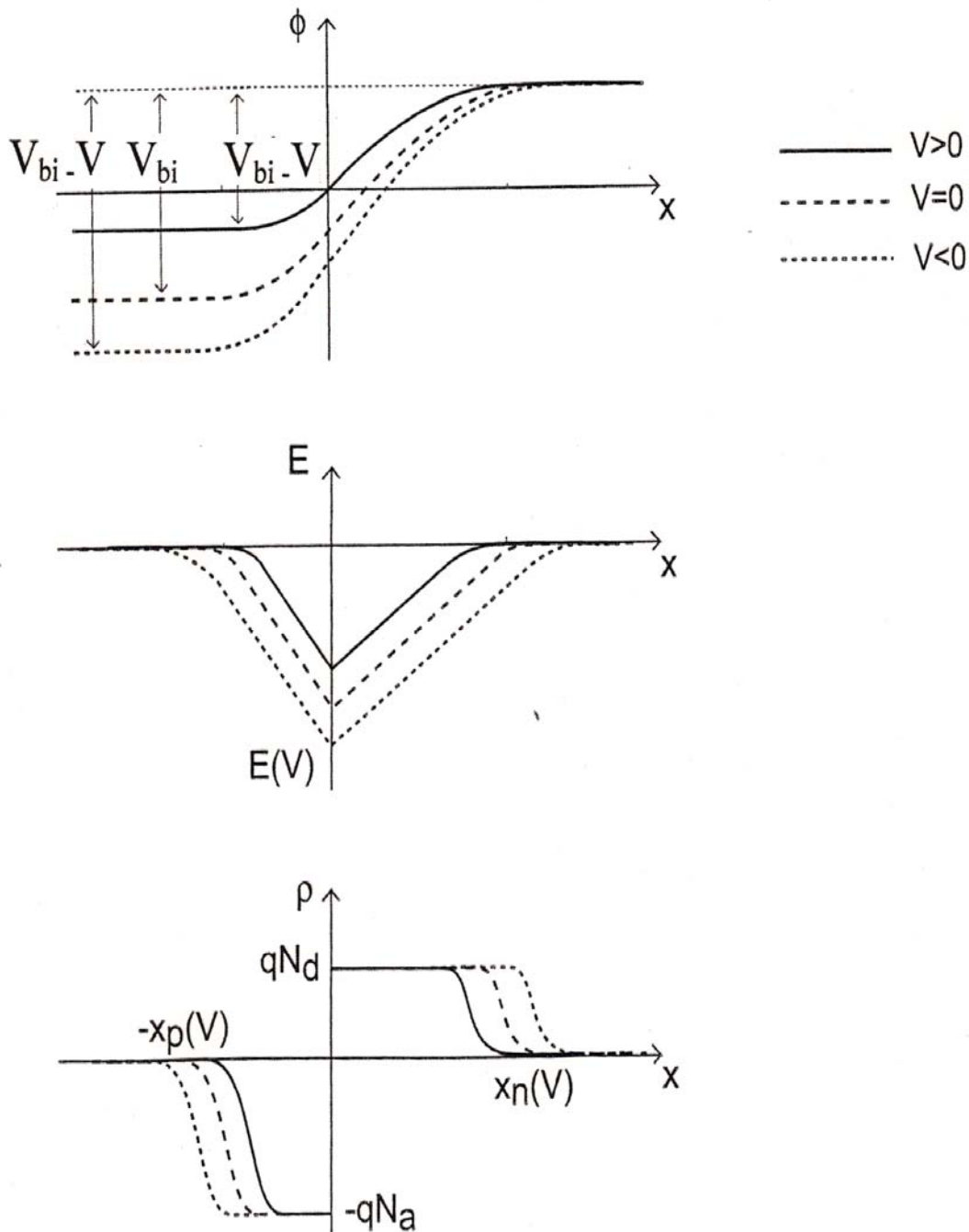
$$|E_{\max}| = \sqrt{\frac{2q(V_{bi} - V) N_a N_d}{\varepsilon_s \varepsilon_o (N_a + N_d)}}$$

Μπορούν να γραφτούν με τη μορφή

$$x_n(V) = x_{n0} \sqrt{1 - \frac{V}{V_{bi}}} \quad x_p(V) = x_{p0} \sqrt{1 - \frac{V}{V_{bi}}}$$

$$w_n(V) = w_{n0} \sqrt{1 - \frac{V}{V_{bi}}} \quad |E_{\max}(V)| = |E_{\max 0}| \sqrt{1 - \frac{V}{V_{bi}}}$$

Ηλεκτροστατικό δυναμικό, ηλεκτρικό πεδίο, εύρος περιοχής φορτίων χώρου, πυκνότητα φορτίου πολωμένης επαφής p-n



Παράδειγμα υπολογισμού του εύρους της περιοχής φορτίων χώρου και του E_{\max} ανάστροφα πολωμένης διόδου επαφής pn

3. Να υπολογίσετε το εύρος της περιοχής φορτίων χώρου σε μια δίοδο επαφής pn για ανάστροφη τάση πόλωσης $V_R = 5 \text{ V}$. Θεωρείστε μια δίοδο πυριτίου στους 300 K με συγκεντρώσεις προσμίξεων $N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ και ενδογενή συγκέντρωση $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Λύση

Το δυναμικό επαφής υπολογίστηκε στο Παράδειγμα 1 και είναι $V_{b_i} = 0.635 \text{ V}$. Το εύρος της περιοχής φορτίων χώρου είναι:

$$W = \left\{ \frac{2\varepsilon_s \varepsilon_0 (V_{b_i} + V_R) \left[\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right]}{q} \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{2(11,7)(8,85 \times 10^{-14})(0,635 + 5) \left[\frac{10^{16} + 10^{15}}{(10^{16})(10^{15})} \right]}{1,6 \times 10^{-19}} \right\}^{1/2}$$

$$\text{Δηλαδή } W = 2,83 \times 10^{-4} \text{ cm} = 2,83 \mu\text{m}.$$

✓ Το w αυξήθηκε από 0,951 μm με μηδενική τάση πόλωσης σε 2,83 μm με ανάστροφη τάση πόλωσης 5 V.

4. Για το σχεδιασμό μιας διόδου pn ώστε να πετύχουμε προδιαγραφές μέγιστου ηλεκτρικού πεδίου και ανάστροφης τάσης, θεωρείστε μια δίοδο πυριτίου pn στους 300 K, με $N_a = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ στην περιοχή p-τύπου. Να υπολογίσετε τη συγκέντρωση προσμίξεων στην περιοχή n-τύπου έτσι ώστε το μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο να είναι $|E_{\max}| = 3 \times 10^5 \text{ V/cm}$ για $V_R = 25 \text{ V}$.

Λύση

Το μέγιστο ηλεκτρικό πεδίο δίνεται από την εξίσωση

$$E_{\max} = - \left\{ \frac{2q(V_{b_i} + V_R) \left(\frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right)}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \right\}^{1/2}$$

Παραλείποντας τη V_{b_i} διότι $V_R \gg V_{b_i}$, μπορούμε να γράψουμε :

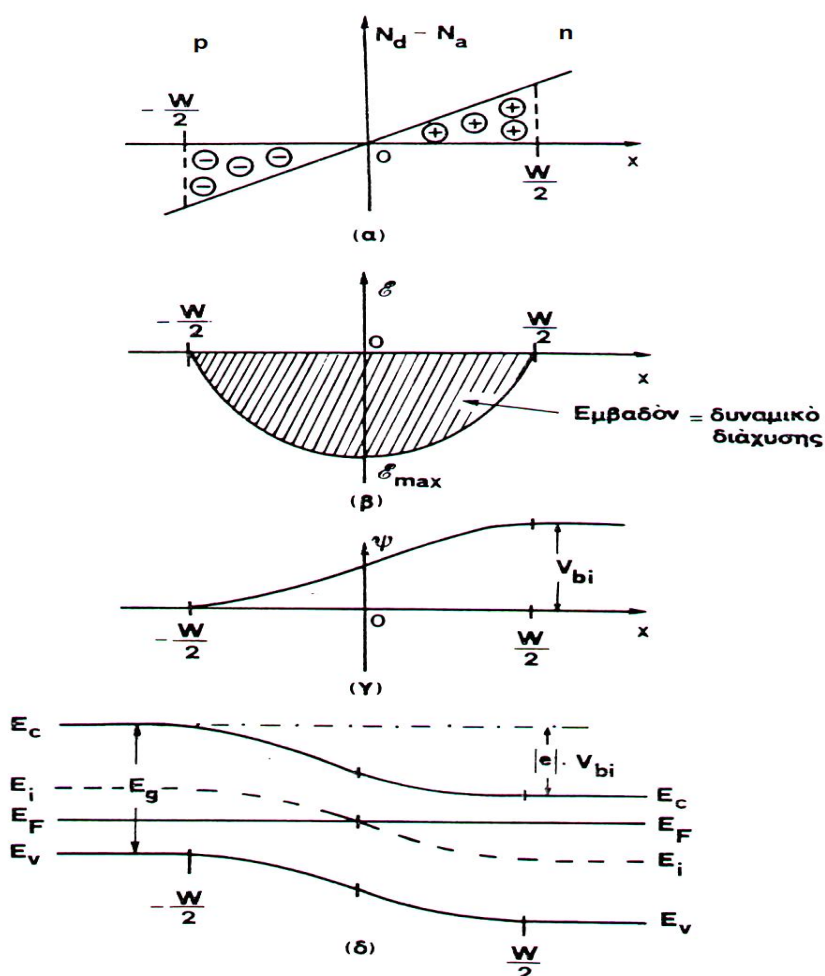
$$|E_{\max}| \approx \left\{ \frac{2qV_R \left[\frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right]}{\varepsilon_s \varepsilon_0} \right\}^{1/2} \Rightarrow 3 \times 10^5 = \left\{ \frac{2(1,6 \times 10^{19})(25) \left[\frac{10^{18} N_d}{10^{18} + N_d} \right]}{(11,7)(8,85 \times 10^{-14})} \right\}^{1/2} \Rightarrow$$
$$N_d = 1,18 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

✓ Μία μικρότερη τιμή της N_d δίνει μικρότερο $|E_{\max}|$ για μία ορισμένη V_R , συνεπώς η τιμή N_d στο συγκεκριμένο παράδειγμα είναι η μέγιστη.

Δυναμικό διάχυσης και εύρος της περιοχής φορτίων χώρου στη γραμμικά βαθμιαία επαφή p-n

Η κατανομή των προσμίξεων (φορτίων) στην περιοχή άντλησης κατά προσέγγιση παριστάνεται με ευθεία γραμμή κλίσης α (σε m^{-4}).

$$-\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = \frac{dE(x)}{dx} \cong \frac{q}{\epsilon_s \epsilon_0} \cdot \alpha x, \quad \text{για} \quad -\frac{W}{2} \leq x \leq \frac{W}{2}$$



Γραμμικά βαθμιαία επαφή p-n στην κατάσταση της θερμικής ισορροπία

- (α) Κατανομή των προσμίξεων (φορτίων)
- (β) Κατανομή του εσωτερικού ηλεκτροστατικού πεδίου
- (γ) Κατανομή του ηλεκτροστατικού δυναμικού
- (δ) Ενεργειακό διάγραμμα της επαφής

- Ένταση του εσωτερικού ηλεκτροστατικού πεδίου $E(x)$ ως συνάρτηση της θέσης ολοκληρώνοντας με οριακές συνθήκες $E(x=-W/2)=E(x=W/2)=0$

$$E(x) = -\frac{q\alpha}{\epsilon_s \epsilon_o} \cdot \frac{(\frac{W}{2})^2 - x^2}{2}$$

- Τη μέγιστη τιμή της έντασης $E(x)$ τη παίρνουμε στη θέση $x=0$ της επαφής

$$|E_{\max}| = \frac{q \cdot \alpha \cdot W^2}{8\epsilon_s \epsilon_o}$$

- Δυναμικό επαφής V_{bi} με δεύτερη ολοκλήρωση με οριακές συνθήκες $\psi(x=-W/2)=0$ και $\psi(x=W/2)=V_{bi}$,

$$V_{bi} = \frac{q \cdot \alpha \cdot W^3}{12\epsilon_s \epsilon_o}$$

- το ολικό εύρος της περιοχής φορτίων χώρου W

$$W = \left(\frac{12\epsilon_s \epsilon_o V_{bi}}{q \cdot \alpha} \right)^{1/3}$$

- ενδογενής στάθμη του Fermi $E_i = -q \cdot \psi(x)$ στο σχήμα δ. Οι ακμές των ταινιών αγωγιμότητας E_c και σθένους E_v ακολουθούν τη μεταβολή της στάθμης $E_i \Rightarrow N_a = N_d = \alpha \cdot W/2$.

- Αν εφαρμόσουμε μια εξωτερική πόλωση V , το εύρος W θα είναι (+για $V < 0$ και $-V > 0$):

$$W = \left[\frac{12\epsilon_s \epsilon_o}{q \cdot \alpha} \cdot (V_{bi} \pm V) \right]^{1/3}$$

Χωρητικότητα επαφής C_j

Δύο είδη χωρητικότητας:

1. χωρητικότητα επαφής ή διαφορική χωρητικότητα ή χωρητικότητα άντλησης C_j
 - σχετίζεται με την περιοχή άντλησης (περιοχή φορτίων χώρου)
 - οφείλεται στη μεταβολή του w
 - κυριαρχεί σε συνθήκες ανάστροφης τάσης πόλωσης ($V < 0$ για επαφή pn)
2. χωρητικότητα διάχυσης C_{do}
 - σχετίζεται με την αποθήκευση φορτίων (εγχεόμενοι φορείς μειοψηφίας, ηλεκτρόνια και οπές) γιατί μέσα από την επαφή περνάει ισχυρό ρεύμα σε συνθήκες ορθής τάσης πόλωσης ($V_F >$ από την τάση κατωφλίου της επαφής)
 - κυριαρχεί σε συνθήκες ορθής τάσης πόλωσης, ($V > 0$ για επαφή pn)

Χωρητικότητα επαφής ή διαφορική χωρητικότητα ή χωρητικότητα άντλησης C_j :

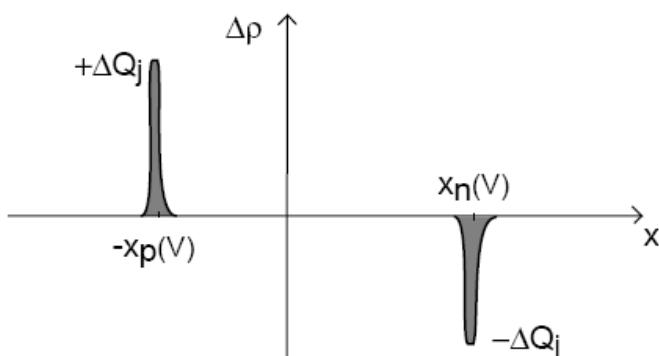
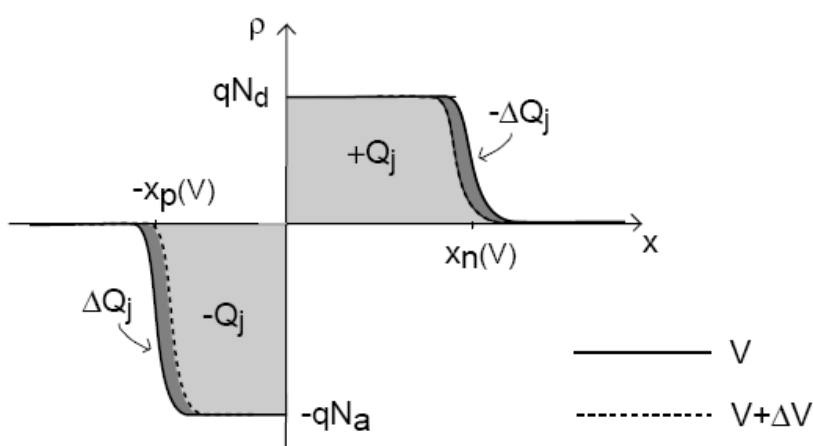
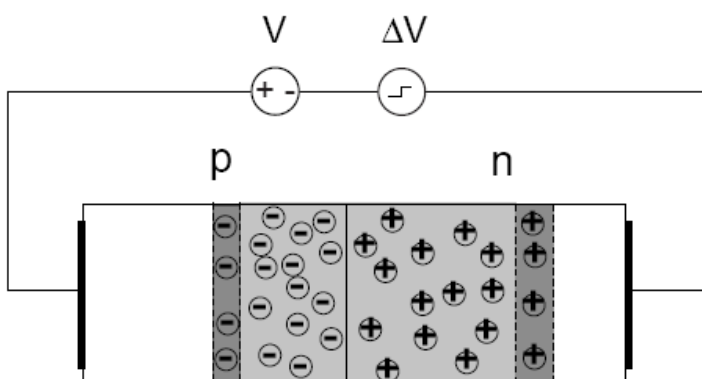
σχετίζεται με την περιοχή φορτίων χώρου μίας επαφής p-n με εμβαδόν διατομής ίσο με τη μονάδα επιφάνειας και

ορίζεται από τη σχέση:

$$C_j = dQ / dV \quad (\text{F/cm}^2)$$

- dQ : διαφορική μεταβολή του φορτίου (ακίνητου) στην περιοχή φορτίων χώρου
- λόγω της μεταβολής του εύρους W , dW
- dW : οφείλεται στην διαφορική μεταβολή της τάσης dV (εφαρμογή ασθενούς εναλλασσόμενου σήματος πέρα της συνεχούς τάσης), διότι μία αύξηση της ανάστροφης τάσης dV_R , θα δημιουργήσει επιπλέον θετικά φορτία στην n περιοχή και επιπλέον αρνητικά φορτία στην p περιοχή.

Εφαρμογή μικρού σήματος στην ανάστροφη dc τάση

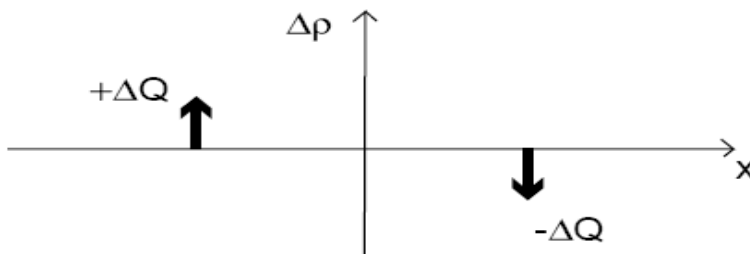
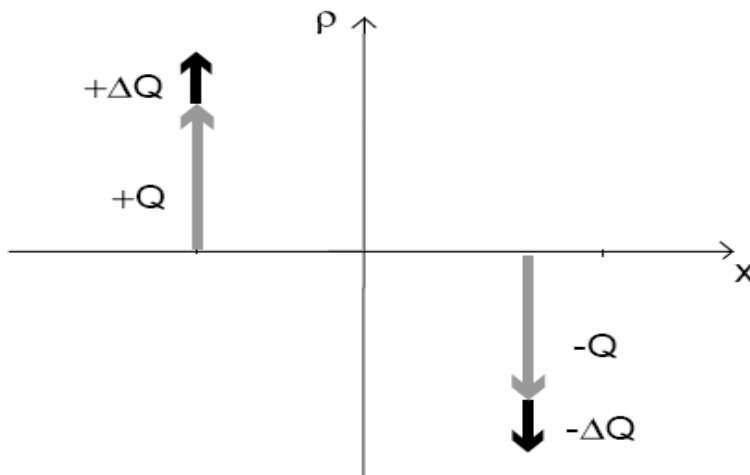
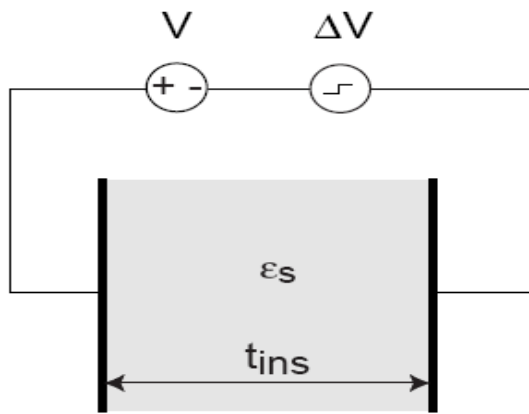


διαφορική μεταβολή της τάσης dV

\Rightarrow μεταβολή ΔQ_j στο $-x_p$

\Rightarrow μεταβολή $-\Delta Q_j$ στο x_n

Μοιάζει με επίπεδο πυκνωτή



Η χωρητικότητα του πυκνωτή ανά μονάδα επιφάνειας $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s}{t_{insul}}$.

Η $C_j(V)$ της επαφής pn είναι ισοδύναμη με τη C ενός επιπέδου πυκνωτή που απέχουν οι οπλισμοί του απόσταση W και ανάμεσά τους υπάρχει διηλεκτρικό με διηλεκτρική σταθερά ϵ_s

Χωρητικότητα επαφής $C_j(V)$ ανά μονάδα επιφάνειας:

$$C_j = \frac{dQ}{dV} = \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{W}$$

Ειδικές περιπτώσεις απότομης επαφής: 1. Μονόπλευρη απότομη επαφή $p^+ - n$ ή $n^+ - p$

$$C = A \left[\frac{q \cdot \epsilon_s \epsilon_0 N}{2(V_{bi} \pm V)} \right]^{1/2}$$

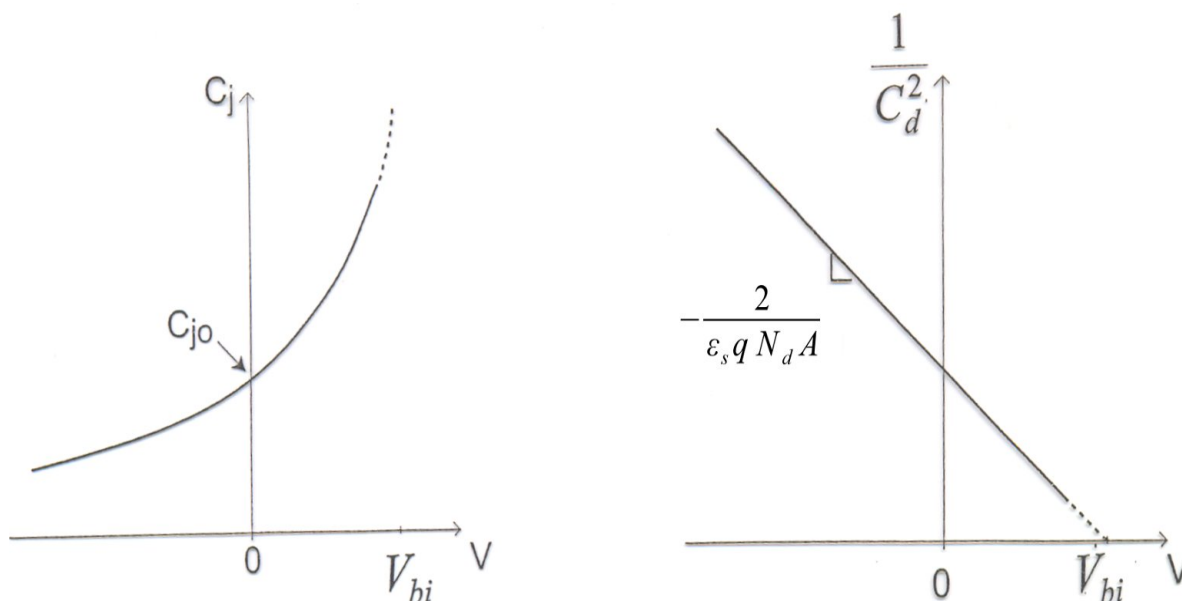
$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{q \cdot \epsilon_s \epsilon_0 \cdot N \cdot A^2} \cdot (V_{bi} \pm V)$$

τα πρόσημα: + για ανάστροφη και - για ορθή τάση πόλωσης

Η γραφική παράσταση της C^{-2} ως συνάρτηση της V (συνεχής τάση) είναι ευθεία γραμμή με κλίση ίση με:

$$\frac{d(C^{-2})}{dV} = \frac{2}{q \cdot \epsilon_s \epsilon_0 \cdot N \cdot A^2}$$

- Από την κλίση προσδιορίζουμε το N στην περιοχή n ή p , αντίστοιχα, για τις επαφές $p^+ - n$ ή $n^+ - p$
- από την τομή της ευθείας γραμμής με τον άξονα της τάσης V (δηλαδή, όταν $C^{-2} = 0$) προσδιορίζουμε το V_{bi} της επαφής



2.Γραμμικά βαθμιαία επαφή

$$C = \left[\frac{q \cdot a \cdot (\epsilon_s \epsilon_o)^2 N}{12(V_{bi} \pm V)} \right]^{1/3}$$

$$\frac{1}{C^3} = \frac{12}{|e| \cdot \alpha \cdot \epsilon_s^2 \epsilon_o^2} \cdot (V_{bi} \pm V)$$

Παρόμοια με την απότομη επαφή, από τη γραφική παράσταση της ποσότητας C^{-3} ως συνάρτηση της τάσης πόλωσης V που είναι ευθεία γραμμή προσδιορίζουμε τις παραμέτρους α και V_{bi} της γραμμικά βαθμιαίας επαφής V_{bi}

$$\frac{d(C^{-3})}{dV} = \frac{12}{|e| \cdot \alpha \cdot \epsilon_s^2 \epsilon_o^2}$$

Παράδειγμα υπολογισμού της χωρητικότητας ανάστροφα πολωμένης διόδου επαφής pn

5. Να υπολογίσετε τη χωρητικότητα επαφής C_j διόδου επαφής pn με $N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ και $N_d = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ για $V_R = 5 \text{ V}$. Δίνεται : $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Λύση

Η χωρητικότητα επαφής υπολογίζεται από τον τύπο:

$$C_j = \left\{ \frac{q \epsilon_s \epsilon_0 N_a N_d}{2(V_{bi} + V)(N_a + N_d)} \right\}^{1/2} \Rightarrow$$
$$C_j = \left\{ \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})(11,7)(8,85 \times 10^{-14})(10^{16})(10^{15})}{2(0,635 + 5)(10^{16} + 10^{15})} \right\}^{1/2} = 3,66 \times 10^{-9} \text{ F / cm}^2$$

Αν το εμβαδόν διατομής της επαφής pn για παράδειγμα είναι $A = 10^{-4} \text{ cm}^2$ τότε η συνολική χωρητικότητα της επαφής είναι $C_{j\text{ολ.}} = 0,366 \cdot 10^{-12} \text{ F} = 0,366 \text{ pF}$.

✓ Η τιμή της χωρητικότητας της επαφής είναι της τάξης των pF ή και μικρότερη

6. Να βρείτε τη συγκέντρωση των προσμίξεων σε μια επαφή p⁺n πυριτίου ($T = 300 \text{ K}$ και $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) από τη γραφική παράσταση $\frac{1}{C_j^2} - V$. Θεωρείστε ότι η τομή της ευθείας με τον άξονα V_R μας δίνει το $V_{bi} = 0,855 \text{ V}$ και η κλίση της είναι $1,32 \cdot 10^{15} (\text{F/cm}^2)^{-2} (\text{V})^{-1}$.

Λύση

Η κλίση της ευθείας $\frac{1}{C_j^2} - V$ είναι: $2 / q \epsilon_s \epsilon_0 N_d \Rightarrow$

$$N_d = \frac{2}{q \epsilon_s \epsilon_0 (\text{κλίση})} = \frac{2}{(1,6 \times 10^{-19})(11,7)(8,85 \times 10^{-14})(1,32 \times 10^{15})} = 9,15 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

Από τη σχέση της V_{bi} η οποία είναι:

$$V_{bi} = V_T \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \Rightarrow N_a = \frac{n_i^2}{N_d} \exp \left(\frac{eV_{bi}}{kT} \right) =$$

$$\frac{(1,5 \cdot 10^{10})^2}{9,15 \cdot 10^{15}} \exp \left(\frac{0,855}{0,0259} \right) = 5,34 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

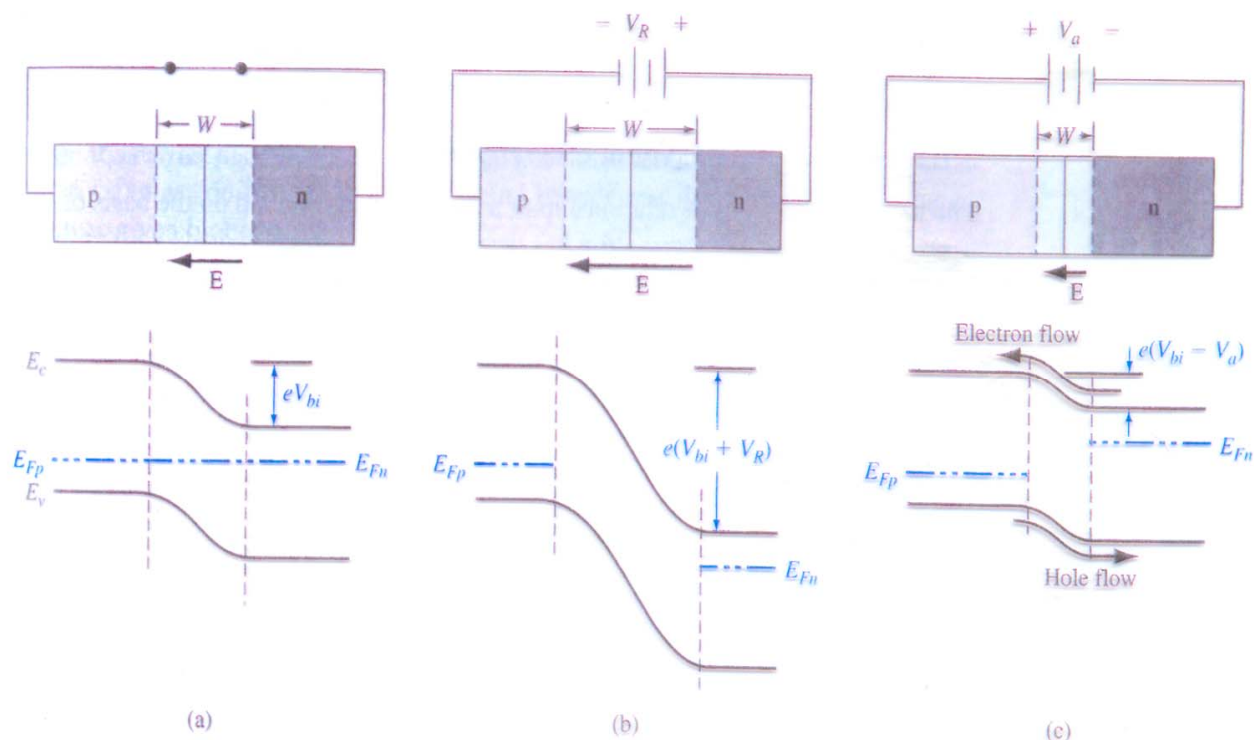
✓ Τα αποτελέσματα αυτού του παραδείγματος δείχνουν ότι $N_a \gg N_d$: επομένως η υπόθεση της μονόπλευρης επαφής ήταν σωστή.

Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης I-V ιδανικής διόδου επαφής p-n

Βασική ιδιότητα: επιτρέπει τη διέλευση του ρεύματος μόνο προς τη μία κατεύθυνση, δηλαδή παρουσιάζει ανορθωτική δράση

Σχηματική-Ποιοτική περιγραφή

Μηχανισμοί ρεύματος με βάση τα ενεργειακά διαγράμματα της επαφής όταν εφαρμόζεται εξωτερική τάση



Ενεργειακά διαγράμματα επαφής pn α) κατάσταση θερμικής ισορροπίας, $V=0$, β) ανάστροφη πόλωση $V<0$, γ) ορθή πόλωση $V>0$

Για $V=0$ η στάθμη της ενέργειας Fermi είναι σταθερή στις περιοχές p και n, και το V_{bi} διατηρεί την θερμική ισορροπία

Για $V \neq 0$ μετατοπίζεται η στάθμη της ενέργειας Fermi στην ουδέτερη περιοχή n, E_{Fn} , από την αντίστοιχη στάθμη στην ουδέτερη περιοχή p, E_{Fp}

Για $V<0$, αυξάνει το φράγμα δυναμικού στη κίνηση των φορέων κατά qV_R (V_R : ανάστροφη τάση πόλωσης) και είναι $q(V_{bi} + V_R)$

Για $V>0$, μειώνεται το φράγμα δυναμικού στη κίνηση των φορέων κατά qV_a (V_a : ορθή τάση πόλωσης) και είναι $q(V_{bi} - V_a)$

- Για θετικές τιμές του $V > V_{bi}$ έχουμε αγωγή του ρεύματος
- Για αρνητικές τιμές του V έχουμε αποκοπή του ρεύματος

Συνθήκες ιδανικότητας σε μια δίοδο επαφής p-n

Παραδοχές-προσεγγίσεις:

- 1) Απότομα όρια για την περιοχή άντλησης ($-x_p < x < x_n$). Οι εξωτερικές τάσεις πόλωσης εμφανίζονται μόνο στις ακμές της περιοχής άντλησης. Οι υπόλοιπες περιοχές είναι ουδέτερες.
- 2) Ισχύει η στατιστική του Boltzmann για τον προσδιορισμό της κατανομής των συγκεντρώσεων των φορέων, δηλ. η συγκέντρωση φορέων στα όρια της περιοχής άντλησης καθορίζεται από το ηλεκτρικό δυναμικό
- 3) Ασθενής έγχυση φορέων μειοψηφίας, συγκέντρωση εγγεόμενων φορέων μειοψηφίας μικρότερη της συγκέντρωσης φορέων πλειοψηφίας, δηλ. $\Delta n_p \ll p_p$ και $\Delta p_n \ll n_n$
- 4) Αμελητέα γένεση ή ανασύζευξη ζευγαριών ηλεκτρονίου-οπής στην περιοχή άντλησης ($G=0, R=0$) \Rightarrow σταθερά ρεύματα ηλεκτρονίων και οπών κατά μήκος της περιοχής άντλησης
- 4) Σταθερό ολικό ρεύμα δια μέσου ολόκληρης της δομής της επαφής pn
- 5) τα ρεύματα ηλεκτρονίων και οπών είναι συνεχείς συναρτήσεις σε ολόκληρη τη δομή της επαφής

Η επαφή pn ορθά πολωμένη

Εφαρμογή εξωτερικής τάσης $V > 0$

- Το φράγμα δυναμικού μειώνεται $V_{\text{ολικό}} = V_{\text{bi}} - V$
 - Μείωση του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου
 - Τα ηλεκτρόνια και οι οπές πλειοψηφίας εκατέρωθεν της επαφής διαπερνούν εύκολα την επαφή \Rightarrow διαχέονται στη σχεδόν ουδέτερη περιοχή
 - Χαλάει η ισορροπία μεταξύ διάχυσης και ολίσθησης
 - $I_{\text{drift}} < I_{\text{diffusion}}$
 - Ροή ρεύματος από τη δίοδο (από την p στην n περιοχή), με συμβατική φορά αντίθετη του ηλεκτροστατικού πεδίου
 - $I_D = I_{\text{diffusion}} - I_{\text{drift}} > 0$
- ✓ Το ρεύμα ολίσθησης είναι πολύ μικρό, αμελητέο αφού οφείλεται στους θερμικά παραγόμενους φορείς που είναι ανεξάρτητοι της τάσης πόλωσης
- ✓ Συνθήκη ιδανικότητας διόδου: μηδενικό E στα όρια στις σχεδόν ουδέτερες περιοχές $\Rightarrow I_{\text{drift}} \approx 0 \Rightarrow$
- **$I_D = I_{\text{diffusion}}$, το ρεύμα της διόδου είναι ρεύμα διάχυσης**

Η επαφή pn ορθά πολωμένη

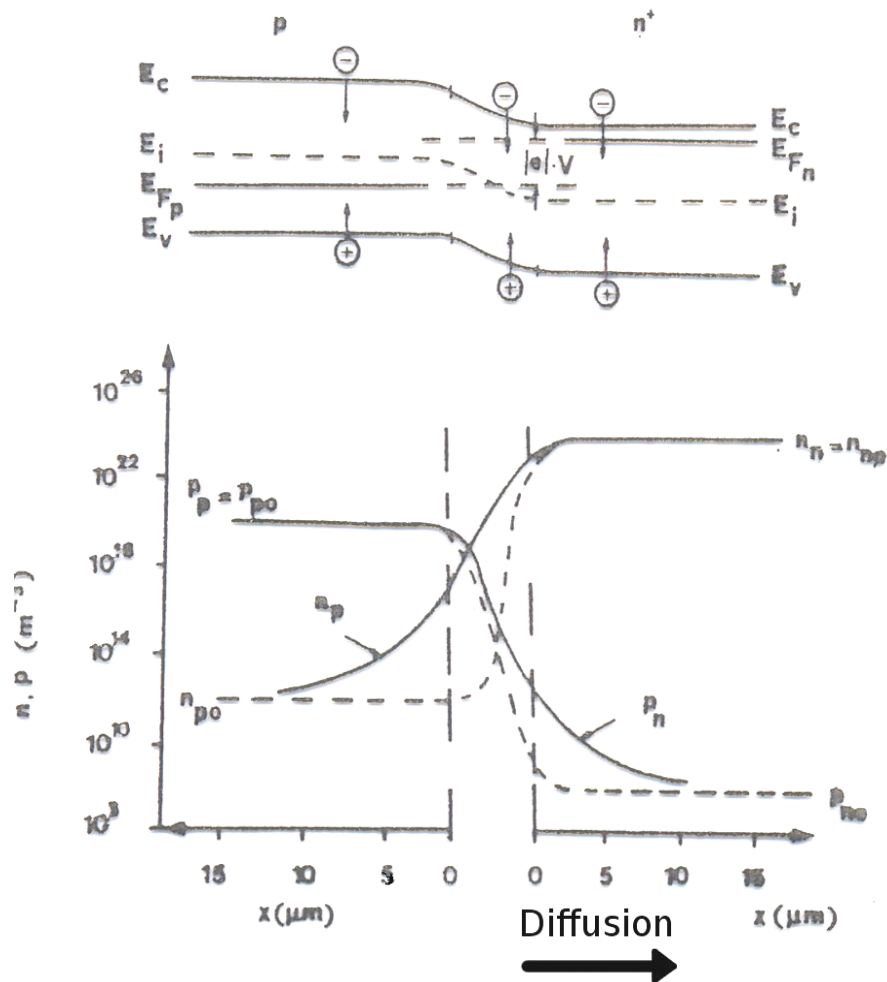
Η μείωση του φράγματος δυναμικού προκαλεί έγχυση περίσσειας φορέων: ηλεκτρονίων από την περιοχή n στην περιοχή p και οπών από την περιοχή p στην περιοχή n

	$V=0$	$V>0$
περιοχή n	$n_n \cdot p_n = n_i^2$	$n_n \cdot p_n > n_i^2$
περιοχή p	$n_p \cdot p_p = n_i^2$	$n_p \cdot p_p > n_i^2$

Η περίσσεια των εγχεόμενων φορέων μειοψηφίας στα δύο τμήματα (ηλεκτρόνια στη περιοχή p και οπές στην περιοχή n) κοντά στις ακμές της περιοχής άντλησης προκαλεί αύξηση της ταχύτητας ανασύζευξης αυτών με τους φορείς πλειοψηφίας,

- Διάχυση περίσσειας φορέων μειοψηφίας συγκέντρωσης p_n , n_p κοντά στη σχεδόν ουδέτερη επαφή και ταυτόχρονα επανασυνδέονται με τους φορείς πλειοψηφίας
- Φορείς ρέουν από το εξωτερικό κύκλωμα για να αποκαταστήσουν την ισορροπία (απώλεια φορέων πλειοψηφίας) στις περιοχές p, n
- ✓ Το μέσο μήκος διάχυσης πριν την ανασύζευξη του φορέα μειοψηφίας είναι το μήκος διάχυσης L_h (οπές), L_e (ηλεκτρόνια)
- ✓ Η ανασύζευξη στην περιοχή άντλησης (όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα) δεν συμβαίνει για ιδανική δίοδο

Διάγραμμα ενεργειακών ταινιών της επαφής p και Συγκέντρωση των φορέων μειοψηφίας για $V>0$



Οι συγκεντρώσεις των φορέων μειοψηφίας (p_n, n_p) είναι αυξημένες κατά τον παράγοντα $\exp(qV_F/kT)$ στα όρια της περιοχής άντλησης

- ✓ Για $V>0$, η ενέργεια Fermi στην περιοχή p, E_{Fp} , είναι χαμηλότερη από την ενέργεια Fermi στην περιοχή n, E_{Fn} , κατά qV_F . Το φράγμα δυναμικού μειώνεται $V_{ολικό} = V_{bi} - V_F$

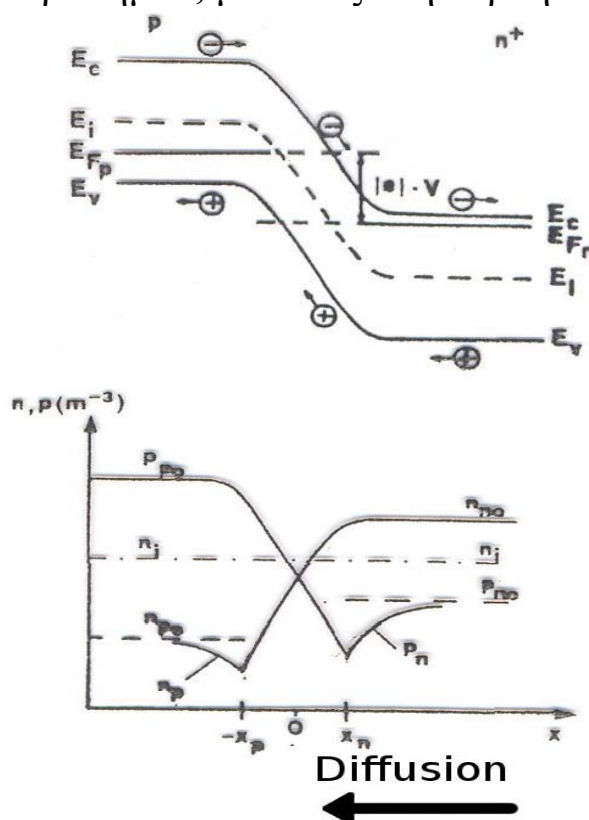
Η επαφή pn ανάστροφα πολωμένη

Εφαρμογή εξωτερικής τάσης $V < 0$

- Το φράγμα δυναμικού αυξάνει $V_{bi} + V$
- Αύξηση του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου
- Οι φορείς πλειοψηφίας διαπερνούν πολύ δύσκολα την επαφή, συνεπώς το ρεύμα διάχυσης (συμβατικό) από την p στην n περιοχή, $I_{diffusion} \approx 0$
- Το ρεύμα ολίσθησης (πολύ μικρό) αντίθετης κατεύθυνσης από την n στην p περιοχή, δεν μεταβάλλεται καθώς υπάρχει μικρή τροφοδοσία φορέων μειοψηφίας (p_n, n_p παράγονται θερμικά)
- $I = I_{diffusion} - I_{drift} < 0 \Rightarrow I = -I_{drift} = -I_s$

✓ Απόσπαση φορέων και όχι έγχυση κοντά στην επαφή \Rightarrow

✓ $p_p \cdot n_p < n_i^2$ και $n_n \cdot p_n < n_i^2 \Rightarrow$ Διάχυση φορέων μειοψηφίας προς την επαφή \Rightarrow Ίδιες εξισώσεις για τη σχέση ρεύματος- τάσης με αλλαγή του πρόσημου, με αυτές στην ορθή πόλωση



Οι συγκεντρώσεις των φορέων μειοψηφίας (p_n, n_p) είναι μειωμένες κατά τον παράγοντα $\exp(qV_R/kT)$ στα όρια της περιοχής άντλησης

Συγκεντρώσεις των φορέων μειοψηφίας πολωμένης επαφής στα όρια της περιοχής φορτίων χώρου

Στο $x=-x_p$ $n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \exp(\frac{qV_F}{kT})$ από τη σχέση $n_p p_p = n_i^2 \exp(\frac{qV_F}{kT})$

$$p_p = p_{p0} \Rightarrow n_p = n_{p0} \exp(\frac{qV_F}{kT})$$

Όμοια για $x=x_n$ $n_n = n_{n0} \Rightarrow p_n = p_{n0} \exp(\frac{qV_F}{kT})$

P_{n0} συγκέντρωση οπών στην περιοχή n, n_{p0} συγκέντρωση ηλεκτρονίων στην περιοχή p σε θερμική ισορροπία

Η επιπλέον συγκέντρωση των φορέων μειοψηφίας $\Delta p_n(x)$ μειώνεται με την απόσταση λόγω ανασύζευξης

$$\Delta p_n(x) = \Delta p_n(x_n) \exp(-\frac{x}{L_h})$$

όπου $\Delta p_n(x) = p_n(x) - p_{n0}$ και $\Delta p_n(x_n) = p_n(x_n) - p_{n0}$

$$\Delta p_n(x_n) = p_n(x_n) - p_{n0} = p_{n0} \left[\exp(\frac{qV_F}{kT}) - 1 \right]$$

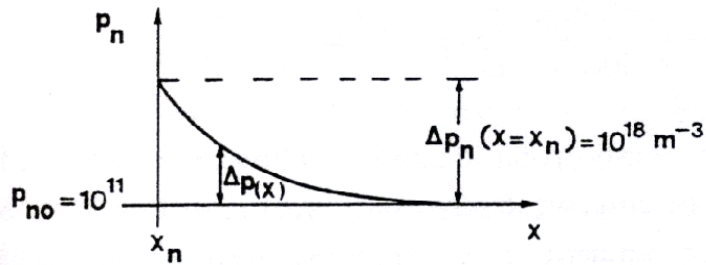
$$\Delta p_n(x) = p_n(x) - p_{n0} = p_{n0} \left[\exp(\frac{qV_F}{kT}) - 1 \right] \exp(-\frac{x-x_n}{L_h})$$

όπου $L_h = \sqrt{D_h \tau_h}$ το μήκος διάχυσης οπών (μέση τιμή απόστασης που διανύουν οι οπές πριν την ανασύζευξη με ηλεκτρόνια στην περιοχή n)

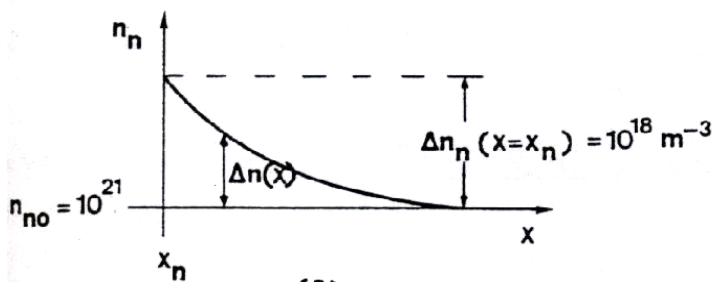
Όμοια και για τους φορείς μειοψηφίας $\Delta n_p(x)$

Παθητικός ρόλος των φορέων πλειοψηφίας σε μία ορθά πολωμένη δίοδο επαφής pn:

Ο ρόλος των φορέων πλειοψηφίας έγκειται στην εξουδετέρωση του στιγμιαίου ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται λόγω της έγχεόμενης περιόδου φορέων μειοψηφίας: το ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο των φορέων πλειοψηφίας προκαλεί ανακατανομή αυτών για την εξουδετέρωση των εγχεόμενων φορέων \Rightarrow ηλεκτρική ουδετερότητα στην περιοχή



(α)



(β)

α) Έγχυση μίας περιόδου οπών στην περιοχή τύπου n επαφής pn και β) η ανακατανομή των ηλεκτρονίων που προκαλείται ώστε να αποκατασταθεί η ηλεκτρική ουδετερότητα της περιοχής

7. Να υπολογιστεί η συγκέντρωση των φορέων μειοψηφίας p_n στην ακμή της περιοχής άντλησης μιας επαφής p^+n με $N_d = 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ όταν είναι ορθά πολωμένη με $0,60 \text{ V}$. Δίνεται: $T = 300 \text{ K}$, $n_i = 1,5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Λύση

$$p_n = p_{n0} \exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right), \text{ όπου } p_{n0} = \frac{n_i^2}{N_d} = \frac{(1,5 \times 10^{10})^2}{10^{16}} = 2,25 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

$$\text{Επομένως έχουμε: } p_n = 2,25 \times 10^4 \exp\left(\frac{0,60}{0,0259}\right) = 2,59 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

✓ Η συγκέντρωση των φορέων μειοψηφίας μπορεί να αυξηθεί κατά πολλές τάξεις μεγέθους στην ορθή πόλωση .

Αναλυτική περιγραφή υπολογισμού των ρευμάτων

Κατά την ορθή πόλωση το ολικό ρεύμα είναι το άθροισμα των ρευμάτων διάχυσης που οφείλονται στην περίσσεια φορέων μειοψηφίας που εγχέονται έξω από τα δύο όρια της περιοχής άντλησης

Ιδανική εξίσωση του Shockley

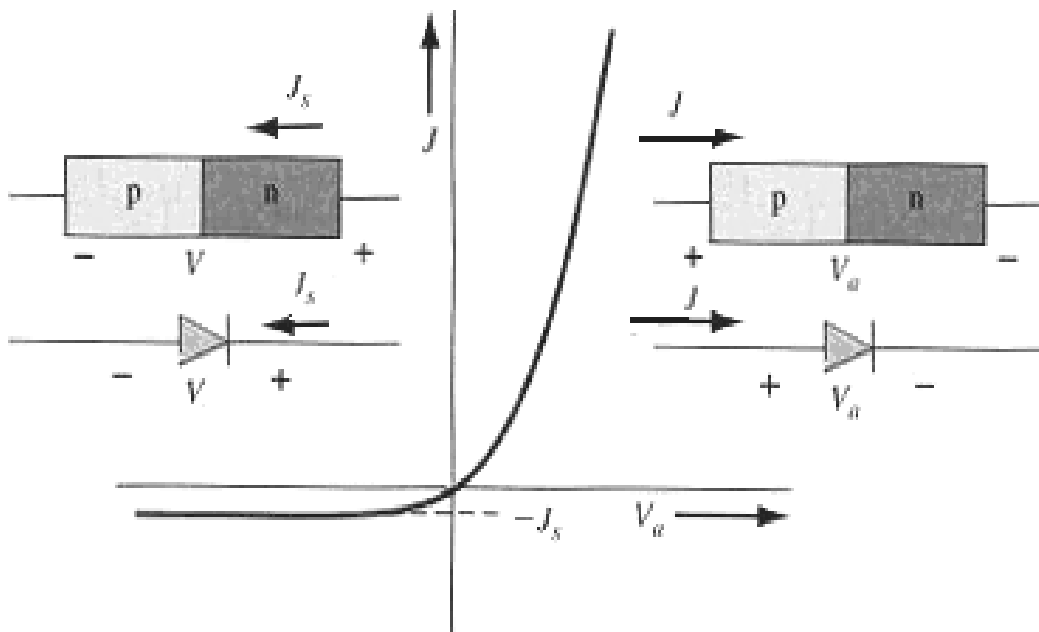
$$J_h = -qD_h \frac{\partial p_n}{\partial x} \Big|_{x=x_n} = \frac{qD_h p_{no}}{L_h} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$J_e = qD_e \frac{\partial n_p}{\partial x} \Big|_{x=-x_p} = \frac{qD_e n_{po}}{L_e} \cdot \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$J = J_h + J_e = J_s \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad \text{Νόμος της ιδανικής διόδου επαφής p-n}$$

Πυκνότητα του ανάστροφου ρεύματος κόρου J_s που εκφράζεται σε συνάρτηση των χαρακτηριστικών του υλικού:

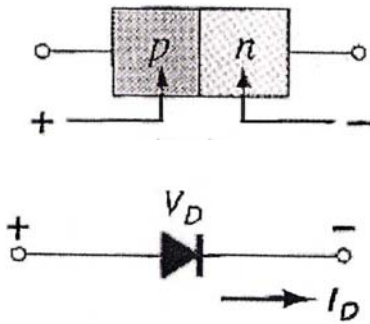
$$J_s = \frac{qD_h p_{no}}{L_h} + \frac{qD_e n_{po}}{L_e} = qn_i^2 \left[\frac{1}{N_a} \sqrt{\frac{D_e}{\tau_e}} + \frac{1}{N_d} \sqrt{\frac{D_h}{\tau_h}} \right]$$



Ορθή πόλωση

$$V_F \gg \frac{3kT}{q} \Rightarrow \exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) \gg 1 \Rightarrow J_F = J_s \exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right)$$

✓ $j_F \propto \frac{n_i^2}{N} \exp\frac{qV_F}{kT}$, Μεγαλύτερη έγχυση φορέων μειοψηφίας, μεγαλύτερο ρεύμα

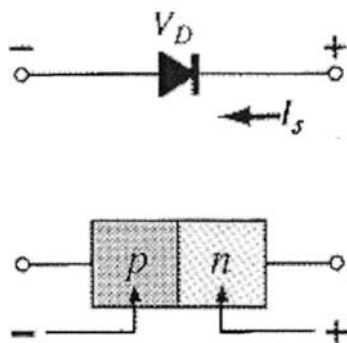


Ανάστροφη πόλωση

$$|V_R| \gg \frac{3kT}{q} \quad |V_R| > 0,078V \quad (kT=0,026eV) \Rightarrow \exp\left(-\frac{qV_R}{kT}\right) \ll 1$$

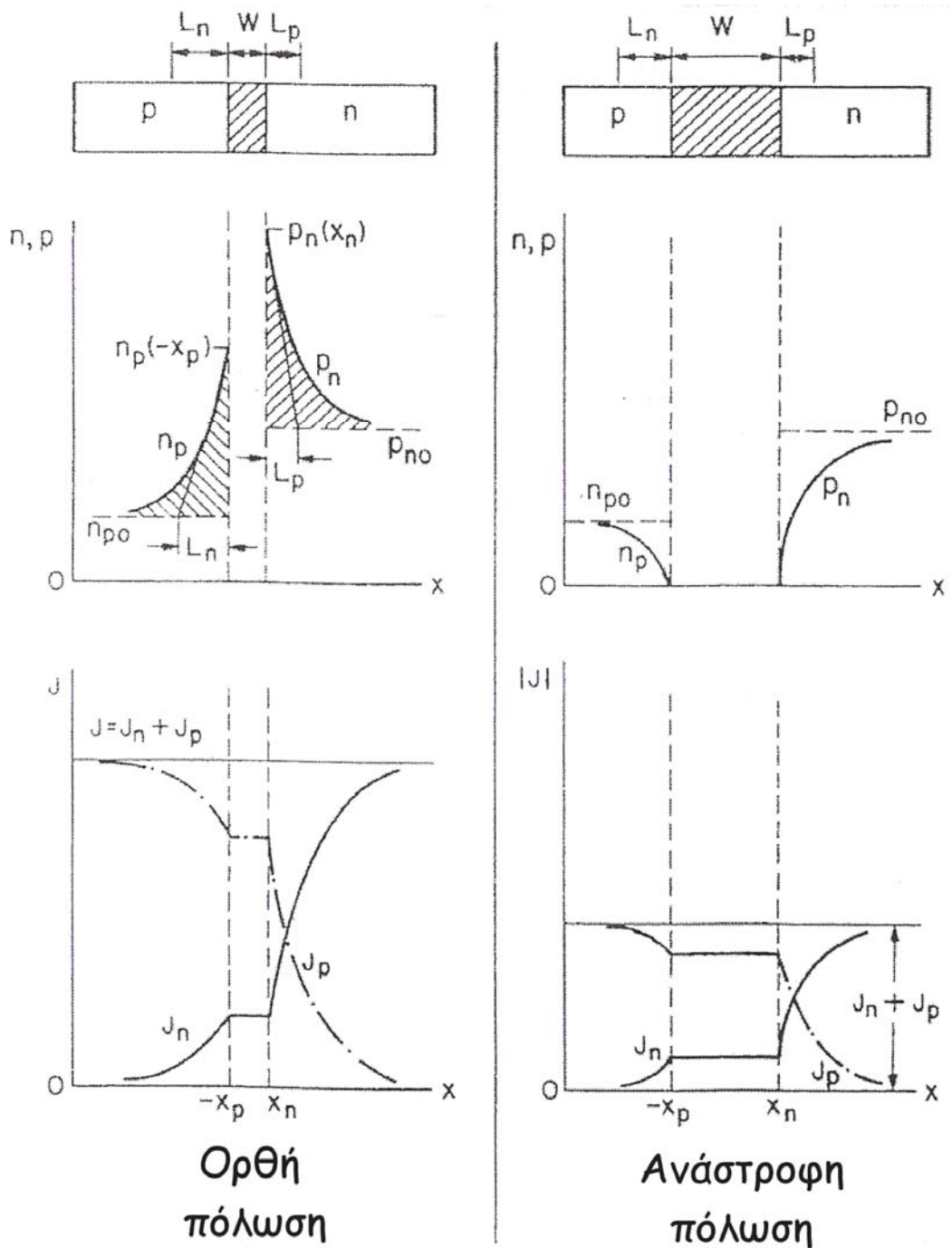
$$\Rightarrow J_R = -J_s$$

✓ $j_R \propto \frac{n_i^2}{N}$, η συγκέντρωση των φορέων μειοψηφίας πέφτει σε πολύ μικρές τιμές, επέρχεται κορεσμός του ρεύματος



Σχόλια:

- $I \propto D$: ταχύτερη διάχυση, μεγαλύτερο ρεύμα
- $I \propto 1/L_{h,e}$: στενότερη περιοχή διάχυσης ($L_{h,e}$), μεγαλύτερο ρεύμα
- $I \propto A$: μεγαλύτερη δίοδος, μεγαλύτερο ρεύμα



Κατανομή της συγκέντρωσης των φορέων μειοψηφίας και κατανομή της πυκνότητας των διαφόρων συνιστωσών του ρεύματος σε μία επαφή p-n για ορθή και ανάστροφη τάση πόλωσης.

8. Να υπολογιστεί η πυκνότητα του ανάστροφου ρεύματος κόρου J_s σε μια ιδανική δίοδο επαφής pn πυριτίου σε θερμοκρασία των 300^0 K . Δίνονται: $N_a = N_d = 10^{16}\text{ cm}^{-3}$, $n_i = 1,5 \times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$, $D_e = 25\text{ cm}^2/\text{s}$, $\tau_h = \tau_e = 5 \times 10^{-7}\text{ s}$, $D_h = 10\text{ cm}^2/\text{s}$, $\epsilon_r = 11,7$.

Λύση

Η πυκνότητα του ανάστροφου ρεύματος κόρου είναι:

$$J_s = \frac{qD_e n_{p0}}{L_e} + \frac{qD_h p_{n0}}{L_h} = qn_i^2 \left[\frac{1}{N_a} \sqrt{\frac{D_e}{\tau_e}} + \frac{1}{N_d} \sqrt{\frac{D_h}{\tau_h}} \right] = 4,15 \times 10^{-11}\text{ A/cm}^2$$

✓ Η πυκνότητα του ανάστροφου ρεύματος κόρου είναι πολύ μικρή. Αν το εμβαδόν διατομής της επαφής $A = 10^{-4}\text{ cm}^2$, τότε το $I_s = 4.15 \times 10^{-15}\text{ A}$.

9. Σχεδιάστε μία δίοδο επαφής pn από πυρίτιο έτσι ώστε $J_e = 20\text{ A/cm}^2$ και $J_h = 5\text{ A/cm}^2$ για $V_a = 0.65\text{ V}$ σε θερμοκρασία $T = 300\text{ K}$. Θεωρήστε τις υπόλοιπες παραμέτρους όπως αυτές δίνονται στο παράδειγμα 8.

Λύση

Η πυκνότητα του ρεύματος διάχυσης των ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με τις τεχνολογικές παραμέτρους N_a, N_d είναι:

$$J_e = \frac{qD_e n_{p0}}{L_e} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] = q \sqrt{\frac{D_e}{\tau_e}} \cdot \frac{n_i^2}{N_a} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right]$$

Αντικαθιστώντας τα δεδομένα, έχουμε:

$$20 = (1,6 \times 10^{-19}) \sqrt{\frac{25}{5 \times 10^{-7}}} \cdot \frac{(1,5 \times 10^{10})^2}{N_a} \left[\exp\left(\frac{0,65}{0,0259}\right) - 1 \right]$$

$$N_a = 1,01 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$$

Η πυκνότητα του ρεύματος διάχυσης των οπών είναι:

$$J_h = \frac{qD_h p_{n0}}{L_h} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] = q \sqrt{\frac{D_h}{\tau_h}} \cdot \frac{n_i^2}{N_d} \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$5 = (1,6 \times 10^{-19}) \sqrt{\frac{10}{5 \times 10^{-7}}} \cdot \frac{(1,5 \times 10^{10})^2}{N_d} \left[\exp\left(\frac{0,65}{0,0259}\right) - 1 \right]$$

$$N_d = 2,55 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$$

- ✓ Το μέγεθος της πυκνότητας του ρεύματος διάχυσης των ηλεκτρονίων και οπών μιας διόδου μεταβάλλεται με την αλλαγή της συγκέντρωσης προσμίξεων στη διάταξη.

10. Να υπολογιστεί το ηλεκτρικό πεδίο που απαιτείται για να παραχθεί ένα δεδομένο ρεύμα ολίσθησης φορέων πλειοψηφίας μακριά από την επαφή. Θεωρήστε μία επαφή πυριτίου pn σε ορθή τάση πόλωσης $V_a = 0,65V$ στους $300K$ με τις παραμέτρους όπως αυτές δίνονται στο παράδειγμα 8. ($J_s = 4,15 \times 10^{-11} A/cm^2$).

Λύση

Η πυκνότητα ρεύματος (συνολική) σε ορθή πόλωση είναι:

$$J = J_s = \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] = (4,15 \times 10^{-11}) \left[\exp\left(\frac{0,65}{0,0259}\right) - 1 \right] = 3,29 A/cm^2$$

Το συνολικό ρεύμα μακριά από την επαφή στην περιοχή n θα είναι ρεύμα ολίσθησης ηλεκτρονίων (φορείς πλειοψηφίας) οπότε μπορούμε να γράψουμε

$$J = J_e \approx q\mu_e N_d E$$

Η συγκέντρωση προσμίξεων είναι $N_d = 10^{16} cm^{-3}$, και αν υποθέσουμε ότι $\mu_e = 1350 cm^2/Vs$, τότε το ηλεκτρικό πεδίο θα είναι:

$$E = \frac{J_e}{q\mu_e N_d} = \frac{3,29}{(1,6 \times 10^{-19})(1350)(10^{16})} = 1,52 V/cm$$

- ✓ Υποθέσαμε, στην παραγωγή της εξίσωσης (του Shockley) ρεύματος-τάσης ιδανικής διόδου επαφής pn, ότι το ηλεκτρικό πεδίο στις ουδέτερες περιοχές p και n είναι μηδέν. Αν και το ηλεκτρικό πεδίο δεν είναι μηδέν, αυτό το παράδειγμα δείχνει ότι το μέγεθός του είναι πολύ μικρό-έτσι η προσέγγιση μηδενικού ηλεκτρικού πεδίου είναι πολύ καλή.

Ρεύμα γένεσης και ανασύζευξης στην περιοχή άντλησης σε πραγματική δίοδο επαφής p-n

Λόγω της γένεσης και ανασύζευξης φορέων στην περιοχή άντλησης οδηγούν σε αύξηση των ρευμάτων της επαφής

- **Ρεύμα γένεσης σε ανάστροφη πόλωση**

$$J_{gen} = q \cdot |U| \cdot W = \frac{qn_i W}{\tau_{eff}}$$

$$W = \left[\frac{2\epsilon_s \epsilon_o}{q} \cdot \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \cdot (V_{bi} + V) \right]^{1/2}$$

U είναι η ταχύτητα γένεσης φορέων, τ_{eff} ο ενεργός χρόνος ζωής τους
Για την απότομη επαφή p-n $J \propto (V_{bi} + V)^{1/2}$

Για τη γραμμικά βαθμιαία επαφή p-n $J \propto (V_{bi} + V)^{1/3}$

- **Ρεύμα ανασύζευξης σε ορθή πόλωση**

Η συνολική πυκνότητα J_F είναι το άθροισμα του ρεύματος διάχυσης και του ρεύματος ανασύζευξης:

$$J_F = J_S \exp\left(\frac{q \cdot |V_F|}{kT}\right) + \frac{q \cdot n_i W}{2\tau_{eff}} \exp\left(\frac{q \cdot |V_F|}{2kT}\right)$$

Οι πραγματικές χαρακτηριστικές $J_F - V_F$ των διόδων επαφής p-n περιγράφονται με την εμπειρική σχέση:

$$J_F \propto \exp\left(\frac{q |V_F|}{\eta kT}\right)$$

- το η μεταβάλλεται μεταξύ 1 και 2 ανάλογα με τον ημιαγωγό και τη θερμοκρασία.
- Επειδή το η καθορίζει την απόκλιση από τη χαρακτηριστική της ιδανικής διόδου, ονομάζεται παράγοντας ιδανικότητας

11. Να υπολογιστεί η πυκνότητα του ρεύματος γένεσης διόδου επαφής p-n με τις παραμέτρους όπως αυτές δίνονται στο παράδειγμα 8.

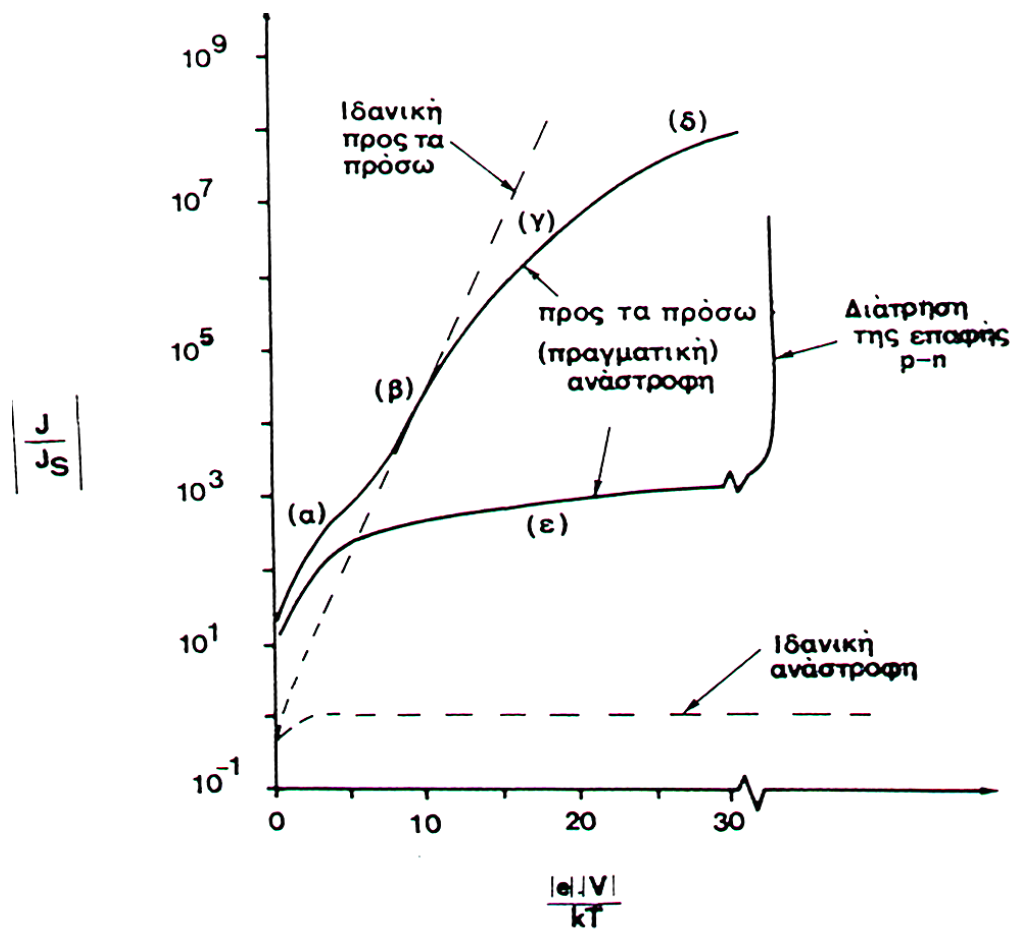
Λύση

$$J_{gen} = \frac{qn_i W}{\tau_{eff}}$$

$$W = \left[\frac{2\varepsilon_s \varepsilon_o}{q} \cdot \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \cdot (V_{bi} + V) \right]^{1/2} = \left[\frac{2 \cdot (11,7) \cdot (8,85 \times 10^{-14})}{1,6 \times 10^{-19}} \cdot \left(\frac{10^{16} + 10^{16}}{10^{16} \times 10^{16}} \right) \cdot (0,695 + 5) \right]^{1/2} = 1,21 \times 10^{-4} \text{ cm}$$

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d N_a}{n_i^2} \right) = (0,0259) \ln \left[\frac{(10^{16})(10^{16})}{(1,5 \times 10^{10})^2} \right] = 0,695 \text{ V}$$

$$J_{gen} = \frac{qn_i W}{\tau_{eff}} = \frac{1,6 \times 10^{-19} \times 1,5 \times 10^{10} \times 1,21 \times 10^{-4}}{5 \times 10^{-7}} = 5,8 \times 10^{-7} \text{ A} \Rightarrow J_{gen} \gg J_s$$



Ιδανική (διακεκομμένες γραμμές) και πραγματική (συνεχείς γραμμές) μορφή των χαρακτηριστικών J-V μιας διόδου επαφής p-n

Ορθό ρεύμα

(α) Περιοχή του ρεύματος ανασύζευξης. (β) Περιοχή του ρεύματος διάχυσης. (γ) Περιοχή της ισχυρής έγχυσης. (δ) Περιοχή της αντίστασης σε σειρά

Ανάστροφο ρεύμα διαρροής

(ε) εξαιτίας του μηχανισμού γένεσης φορέων μέσα στην περιοχή άντλησης της επαφής, καθώς και εξαιτίας επιφανειακών φαινομένων κατά μήκος της επαφής p-n.

Αντίσταση Διόδου επαφής pn

Καθώς το σημείο λειτουργίας μιας διόδου μετακινείται από μια περιοχή σε άλλη η αντίσταση της διόδου αλλάζει εξαιτίας της μη γραμμικότητας των χαρακτηριστικών I-V

- Ο τύπος της εφαρμοζόμενης τάσης ή σήματος καθορίζει την τιμή της αντίστασης
- Δύο διαφορετικού τύποι εφαρμοζόμενης τάσης \Rightarrow
 - DC ή στατική αντίσταση
 - AC ή δυναμική αντίσταση

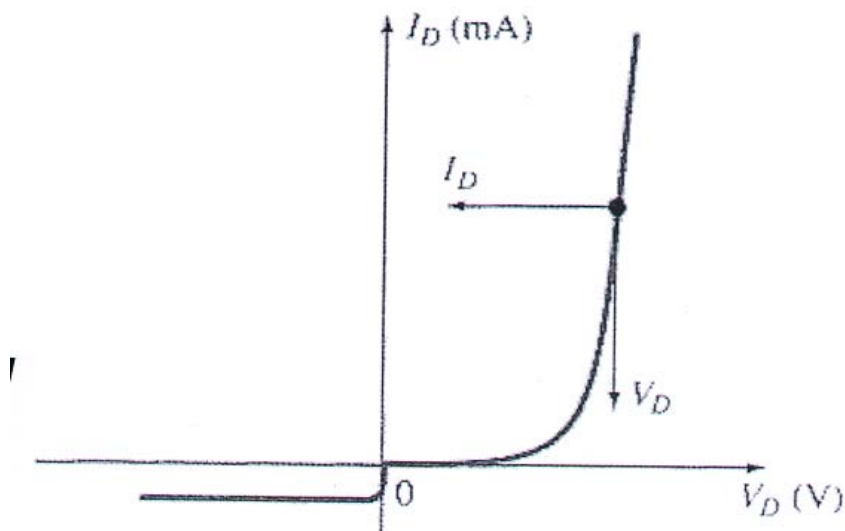
DC ή στατική αντίσταση

Η εφαρμογή dc τάσης στο κύκλωμα της διόδου έχει σαν αποτέλεσμα ένα σημείο λειτουργίας πάνω στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V που δεν μεταβάλλεται με το χρόνο

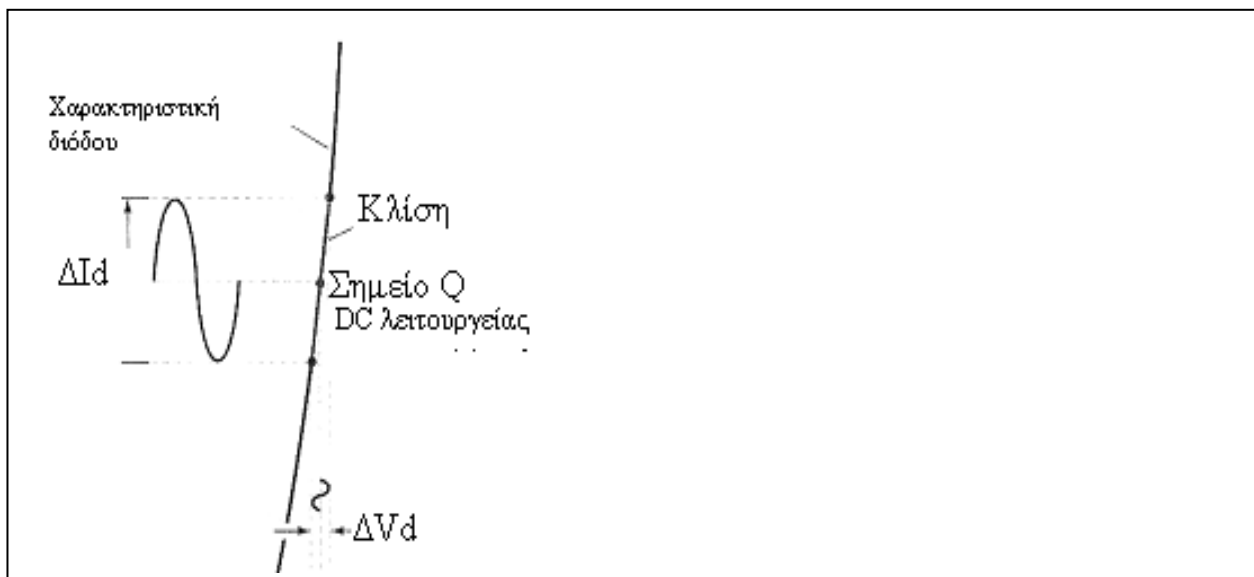
Η αντίσταση της διόδου στο σημείο λειτουργίας είναι:

$$R_D = \frac{V_D}{I_D}$$

Μικρότερο ρεύμα διόδου, μεγαλύτερη dc αντίσταση



AC ή δυναμική αντίσταση (small-signal resistance)



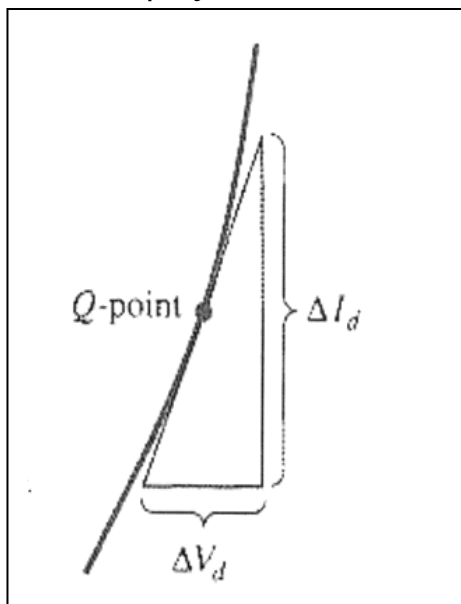
Η μεταβαλλόμενη είσοδος μετακινεί το σημείο λειτουργίας πάνω και κάτω σε μια περιοχή στη χαρακτηριστική I-V και έτσι ορίζει μια ορισμένη μεταβολή στο I_d, V_d .

- Η κλίση στην καμπύλη της χαρακτηριστικής I-V στο σημείο λειτουργίας Q ορίζει τις αλλαγές στην τάση και το ρεύμα, δηλαδή την AC ή δυναμική αντίσταση μιας μη ιδανικής διόδου

$$r_d = \frac{\Delta V_d}{\Delta I_d} = \frac{\eta V_T}{I_{DQ}}$$

- $g_d = \frac{1}{r_d}$, ή διαγωγιμότητα διάχυσης

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν για πραγματική δίοδο, που αποκλίνει από μία ιδανική δίοδο κατά το συντελεστή η , τον ονομαζόμενο συντελεστή ή παράγοντα ιδανικότητας



Χαμηλότερο σημείο λειτουργίας Q (μικρότερο ρεύμα ή τάση διόδου) μεγαλύτερη ac αντίσταση

Μοντέλο ασθενούς σήματος διόδου επαφής pn

Σημαντικό όταν ημιαγωγικές διατάξεις με επαφές χρησιμοποιούνται σε γραμμικά κυκλώματα ενισχυτών όπου εφαρμόζονται ημιτονοειδή σήματα πάνω σε DC ρεύματα και τάσεις

Το πλάτος του σήματος ac είναι μικρό σε σύγκριση με την πόλωση

- **Περιγραφή του τρόπου ελέγχου φόρτισης διόδου στην ορθή πόλωση**

Στην ορθή πόλωση σε επαφή p+n (για απλούστευση πράξεων) το ρεύμα που περνά από την επαφή I_F οφείλεται αποκλειστικά στο ρεύμα διάχυσης οπών $I_h(0)$

$$I_{h(0)} = -AqD_h \frac{dp}{dx} = \frac{AqD_h p_n(0)}{L_h} \quad \text{A}$$

Το περίσσειο φορτίο φορέων μειοψηφίας Q στην πλευρά n (βλέπε στο παρακάτω σχήμα) είναι:

$$Q = \int_0^\infty Aqp_n(0)e^{-x/L_h} dx = AqL_h p_n(0) \quad \text{Cb}$$

Συνδυάζοντας τη σχέση για το ολικό εγχεόμενο φορτίο Q με το αντίστοιχο ρεύμα προκύπτει μια πολύ απλή έκφραση με μορφή λόγου φορτίου προς χρόνο, το μέσο χρόνο ζωής των οπών τ_h

(ή χρόνος μετάβασης: μέσος χρόνος για να διαχυθεί η οπή στην σχεδόν ουδέτερη περιοχή (Quasi Neutral Region) τύπου -n)

$$I_F = \frac{Q}{\tau_h} \quad \text{όπου } \tau_h = L_h^2 / D_h$$

Η σχέση αυτή ονομάζεται περιγραφή του τρόπου ελέγχου φόρτισης διόδου :

Το ρεύμα της διόδου παρέχει φορείς μειοψηφίας στην n περιοχή με έναν ρυθμό ίσο με την ταχύτητα με την οποία οι φορείς εξαφανίζονται λόγω επανασύνδεσης

- Απλή μαθηματική σχέση σε αντίθεση με την εκθετική σχέση μεταξύ I_F και V_F στο ισοδύναμο κύκλωμα

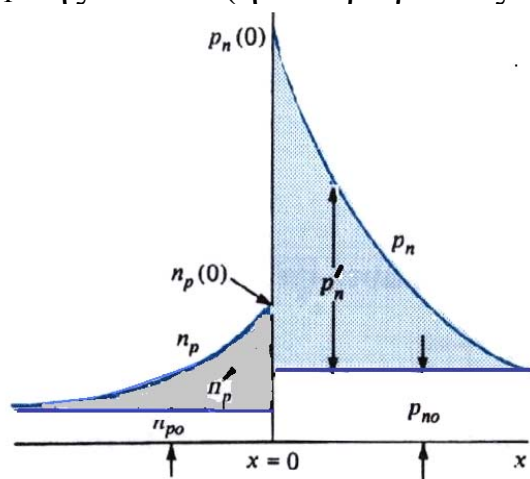
Αποθήκευση φορτίου : χωρητικότητα διάχυσης C_D

οφείλεται στο φορτίο Q της περιόδου των φορέων μειοψηφίας που εγχέεται και παραμένει κοντά στην επαφή p+n (για απλούστευση, $I_F = I_{h(0)}$) έξω από τα όρια της περιοχής άντλησης κατά την ορθή πόλωση. Σε μια επαφή p+n η χωρητικότητα διάχυσης (οφείλεται κύρια στις οπές) είναι :

$$C_D = \frac{dQ}{dV_F} = \tau_h \frac{dI_F}{dV_F} = \frac{\tau_h}{r_d} I_F$$

$$r_d = \frac{\eta V_T}{I} \quad \Rightarrow \quad C_D = \frac{\tau_h I_F}{\eta V_T} F$$

Παρατηρούμε ότι η χωρητικότητα διάχυσης είναι ανάλογη του ρεύματος I_F της διόδου (η ο παράγοντας ιδανικότητας της διόδου)



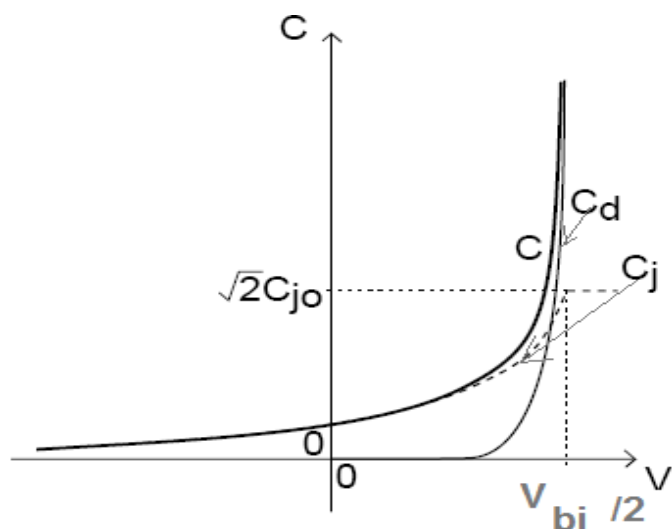
Κατανομή της συγκέντρωσης φορέων μειοψηφίας σε απότομη επαφή p⁺n σε ορθή πόλωση. Η περιοχή άντλησης θεωρείται πολύ μικρή σε σχέση με το μήκος διάχυσης και για αυτό παραλείπεται στο σχήμα.

Σε μια συμμετρική επαφή pn και το ρεύμα μειοψηφίας (ηλεκτρονίων) στην περιοχή p είναι σημαντικό, ισχύει παρόμοια σχέση και για τη χωρητικότητα διάχυσης που οφείλεται στα ηλεκτρόνια,

$$C_{De} = \frac{\tau_e I_F}{\eta V_T} F$$

οπότε η συνολική χωρητικότητα διάχυσης δίνεται από το άθροισμα των δύο επιμέρους χωρητικοτήτων, δηλ. $C_{ολ.} = C_{De} + C_{Dh}$

Εξάρτηση της χωρητικότητας επαφής C_j και χωρητικότητας διάχυσης C_D από την τάση:

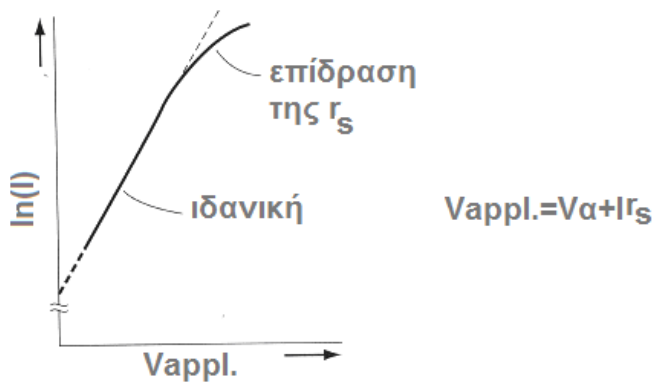
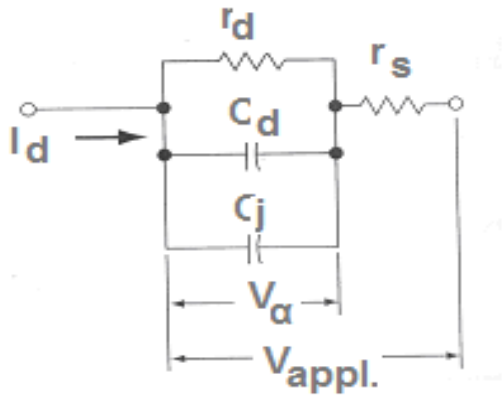


- C_D κυριαρχεί σε μεγάλη ορθή πόλωση ($\propto \exp(qV_F/kT)$)
- C_j κυριαρχεί σε ανάστροφη πόλωση και σε μικρή ορθή πόλωση ($\propto \frac{1}{\sqrt{V_{bi}-V}}$)
- $C_{J,max} = \sqrt{2}C_{J0}$

Το ισοδύναμο κύκλωμα της διόδου

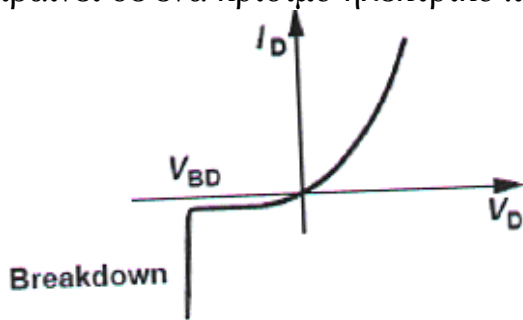
Περιλαμβάνονται:

1. οι χωρητικότητες διάχυσης C_D και επαφής C_J
2. η αντίσταση σε σειρά Γ_S των ουδέτερων περιοχών (περιοχή τύπου p και περιοχή τύπου n), δηλαδή του σώματος της διόδου (της τάξης μερικών Ω)
3. η δυναμική αντίσταση Γ_d της διόδου που καθορίζεται από το σημείο λειτουργίας στη χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης, I-V ($\Gamma_d = dV/dI$)



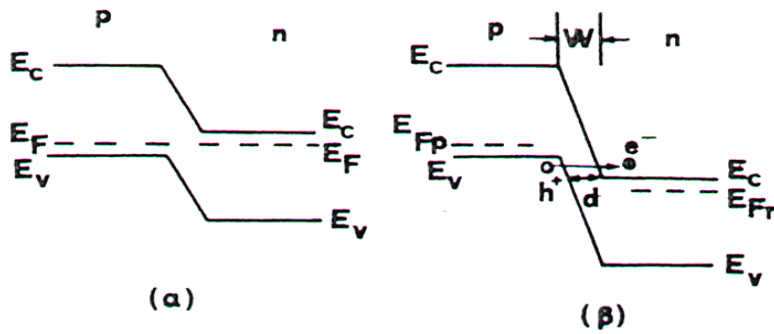
Διάτρηση (breakdown) της διόδου επαφής p-n

Όταν η ανάστροφη τάση πόλωσης φτάσει μια κρίσιμη τιμή, το ανάστροφο ρεύμα της επαφής αυξάνει απότομα σε μεγάλες τιμές. Η διάδος μπορεί να καταστραφεί εξαιτίας της υπερθέρμανσης. Οι κύριοι μηχανισμοί διάτρησης είναι δύο, ο καθένας συμβαίνει σε ένα κρίσιμο ηλεκτρικό πεδίο.



1. Διάτρηση εξαιτίας του φαινομένου της σήραγγας

Σε διόδους επαφής p-n με μεγάλη συγκέντρωση προσμίξεων και μικρό w Συμβαίνει σε μικρή τάση πόλωσης, μερικά volt (π.χ. 6V για $N=10^{18} \text{ cm}^{-3}$)

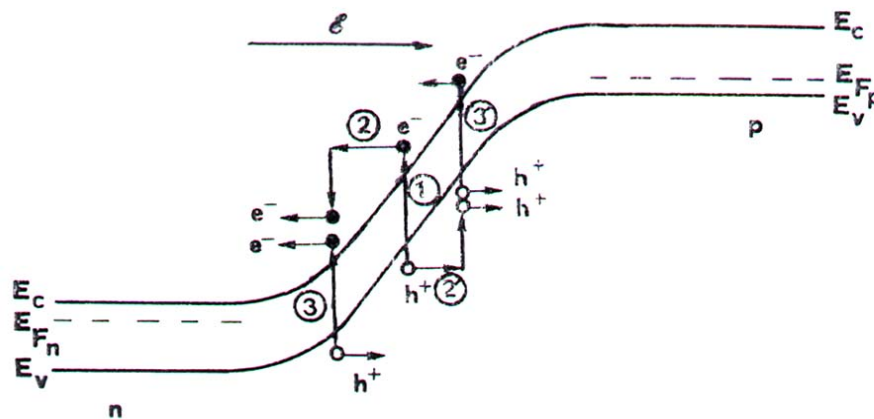


α) Επαφή p-n με πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις προσμίξεων, σε θερμική ισορροπία
 β) Ανάστροφη τάση πόλωσης και μετάβαση ηλεκτρονίου από την περιοχή τύπου p στην περιοχή τύπου n της επαφής εξαιτίας του φαινομένου της σήραγγας.

2. Διάτρηση εξαιτίας του φαινομένου της χιονοστιβάδας

Σε διόδους επαφής p-n με μικρή συγκέντρωση προσμίξεων και μεγάλο w Συμβαίνει σε μεγάλες τάσεις

Η ένταση E είναι μεγάλη, ηλεκτρόνια που μπαίνουν στην περιοχή άντλησης από την περιοχή p επιταχύνονται σε ψηλές τιμές κινητικής ενέργειας, προκαλούν ιονισμό εξαιτίας της κρούσης τους με τα άτομα, \Rightarrow πολλαπλασιασμό φορέων



Πολλαπλασιασμός των φορέων εξαιτίας του φαινομένου της χιονοστιβάδας.

Το ρεύμα όταν το φαινόμενο της χιονοστιβάδας κυριαρχεί είναι:

$I_R = M \cdot I_{RO}$, όπου I_{RO} χωρίς την επίδραση του φαινομένου της χιονοστιβάδας, M ο παράγοντας πολλαπλασιασμού

- Η τάση διάτρησης είναι αντιστρόφως ανάλογη της συγκέντρωσης προσμίξεων της ελαφρά ντοπαρισμένης πλευράς

$$V_R = BV = \frac{\epsilon_o \epsilon_s E_C^2}{2qN}$$

Βιβλιογραφία

1. Τεχνολογία ηλεκτροτεχνικών και ηλεκτρονικών υλικών, Α. Θαναηλάκη
2. Semiconductor Physics and Devices, Donald A. Neamen, Mc Graw Hill, third edition.
3. Microelectronics an integrated approach, Roger T. Howe, Charles G. Sodini, Prentice Hall Electronics and VLSI Series-Charles G.Sodini, Series Editor.
4. Solid State Electronic Devices, Ben G. Streetman Englewood Cliffs, N.J. Prentice-Hall xvii.
5. Device Electronic for Integrated Circuits, Richard S.Muller, Theodore I. Kamins, New York Wiley xii.