

Εισαγωγή στην Ηλεκτρονική Επαφή p-n

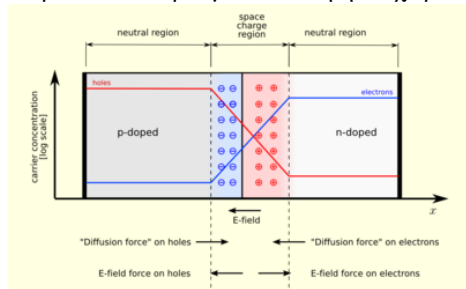
Ιωάννης Ν. Μάργαρης

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών υπολογιστών
Πανεπιστημίου Θεσσαλίας
imargaris@e-ce.uth.gr

Εαρινό εξάμηνο 2018-2019

Τί είναι η επαφή p-n

- Η επαφή p-n είναι μια διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ μιας περιοχής ημιαγωγού εμπλουτισμένης με οπές και μιας περιοχής εμπλουτισμένης με ηλεκτρόνια. Παρακάτω θεωρούμε ότι αυτή η διαχωριστική επιφάνεια είναι επίπεδη.



- Στην p πλευρά οι συγκεντρώσεις των φορέων είναι p_p , n_p για οπές και ηλεκτρόνια αντίστοιχα.
- Στην n πλευρά οι συγκεντρώσεις των φορέων είναι p_n , n_n για οπές και ηλεκτρόνια αντίστοιχα.
- Γύρω από την επαφή εμφανίζεται η περιοχή αραίωσης (depletion region) που ιδανικά είναι κενή φορέων.

Η επαφή p-n σε θερμοδυναμική ισορροπία

- Στη θερμοδυναμική ισορροπία, τα ρεύματα διάχυσης ηλεκτρονίων και οπών αντισταθμίζουν τα αντίστοιχα ρεύματα ολίσθησης.

$$J_n = eD_n \frac{dn}{dx} - en\mu_n \frac{dV}{dx} = 0,$$

$$J_p = -eD_p \frac{dp}{dx} - ep\mu_p \frac{dV}{dx} = 0.$$

- Λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση του Einstein

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_B T}{e} = V_T,$$

οι παραπάνω εξισώσεις μας δίνουν

$$\frac{1}{n} \frac{dn}{dx} = \frac{1}{V_T} \frac{dV}{dx},$$

$$\frac{1}{p} \frac{dp}{dx} = -\frac{1}{V_T} \frac{dV}{dx}.$$

Η επαφή p-n σε θερμοδυναμική ισορροπία (συνέχεια)

- Ολοκληρώνοντας κατά μέλη έχουμε

$$\ln n \Big|_{-\infty}^{+\infty} = \frac{V(x)}{V_T} \Big|_{-\infty}^{+\infty},$$

ή

$$\ln \frac{n_n}{n_p} = \frac{V_{bi}}{V_T},$$

όπου $V_{bi} = V(+\infty) - V(-\infty)$ είναι το built-in (εγγενές) δυναμικό (ή τάση) της επαφής σε θερμοδυναμική ισορροπία και $V_T = k_B T/e$ είναι η λεγόμενη θερμοκή τάση.

- Ομοίως βρίσκουμε

$$\ln \frac{p_n}{p_p} = -\frac{V_{bi}}{V_T}.$$

- Το εγγενές δυναμικό της επαφής είναι της τάξης των $0.6 - 1V$. Η θερμοκή τάση είναι περίπου $25mV$ σε θερμοκρασία δωματίου ($300^\circ K$).

Μήκος περιοχής αραίωσης

- Το μήκος της περιοχής αραίωσης, στην προσέγγιση στην οποία αυτή είναι κενή φορέων, δίνεται από τη σχέση

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{e} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) V_{bi}},$$

όπου $\epsilon_s = \kappa\epsilon_0$, με τη διηλεκτρική σταθερά $\kappa = 11.7$ για το πυρίτιο και $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F/m$ την ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού.

- Η περιοχή αραίωσης εκτείνεται στην p πλευρά της επαφής κατά

$$x_p = W \frac{N_D}{N_A + N_D}$$

και στην n πλευρά κατά

$$x_n = W \frac{N_A}{N_A + N_D}.$$

- Το πλάτος της περιοχής αραίωσης W είναι τόσο μικρότερο, όσο μεγαλύτερος είναι ο εμπλουτισμός των p και n πλευρών της επαφής και είναι ανάλογο του $\sqrt{V_{bi}}$. Η περιοχή αραίωσης εκτείνεται περισσότερο προς την πλευρά n ή p της επαφής που είναι λιγότερο εμπλουτισμένη.

Κάποιες σχέσεις για την επαφή p-n σε θερμοδυναμική ισορροπία

- Στην κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, δηλαδή χωρίς τάση, οι πυκνότητες φορέων πλειονότητας είναι

$$n_n \approx N_D$$

και

$$p_p \approx N_A.$$

- Οι φορείς μειονότητας έχουν συγκέντρωση

$$n_p \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

και

$$p_n \approx \frac{n_i^2}{N_D}.$$

Η επαφή p-n με την εφαρμογή πόλωσης

- Με την εφαρμογή ευθείας πόλωσης (forward bias) στην επαφή p-n θεωρούμε ότι μένουν σταθεροί σε πυκνότητα οι φορείς πλειονότητας p_p, n_n στα σύνορα της περιοχής αραίωσης, αλλά αλλάζουν οι φορείς μειονότητας στα σύνορα της περιοχής αραίωσης και γίνονται n'_p, p'_n από n_p, p_n αντίστοιχα, που είναι στην ισορροπία.
- Θεωρούμε ότι στα σύνορα της περιοχής αραίωσης ισχύουν οι ίδιες σχέσεις όπως και στην ισορροπία για τις πυκνότητες των φορέων, με αντικατάσταση του V_{bi} με $V_{bi} - V$, όπου $V > 0$ είναι η τάση ευθείας πόλωσης. Έχουμε

$$p'_n = p_p e^{-\frac{V_{bi}-V}{V_T}} = p_p e^{-\frac{V_{bi}}{V_T}} e^{\frac{V}{V_T}} = p_n e^{\frac{V}{V_T}}.$$

Ομοίως

$$n'_p = n_n e^{-\frac{V_{bi}-V}{V_T}} = n_n e^{-\frac{V_{bi}}{V_T}} e^{\frac{V}{V_T}} = n_p e^{\frac{V}{V_T}}.$$

- Η μεταβολή των φορέων μειονότητας, σε σχέση με την ισορροπία, στα σύνορα της περιοχής αραίωσης είναι

$$\delta p(x = x_n) = p_n (e^{\frac{V}{V_T}} - 1), \quad \delta n(x = -x_p) = n_p (e^{\frac{V}{V_T}} - 1).$$

Η επαφή p-n με την εφαρμογή πόλωσης (συνέχεια)

- Οι πλεονάζοντες φορείς μειονότητας καθώς οδεύουν προς το άπειρο, επανασυνδέονται με τους φορείς πλειονότητας και νέοι φορείς πλειονότητας αντικαθιστούν τους τελευταίους με διάχυση από τα άκρα της διάταξης, που θεωρούμε ότι βρίσκονται στο άπειρο.
- Η πυκνότητα των φορέων μειονότητας φθίνει εκθετικά με την απόσταση από το σύνορο της περιοχής αραίωσης. Αν $\delta p(x)$, $\delta n(x)$ είναι οι πυκνότητες των φορέων μειονότητας στις περιοχές n και p αντίστοιχα, έξω από την περιοχή αραίωσης, τότε

$$\delta p(x) = \delta p(x = x_n) e^{-(x-x_n)/L_n}, x > x_n,$$
$$\delta n(x) = \delta n(x = -x_p) e^{(x+x_p)/L_p}, x < -x_p.$$

- Έξω από την περιοχή αραίωσης το ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδέν, με αποτέλεσμα το ρεύμα να είναι ρεύμα διάχυσης. Στα σύνορα της περιοχής αραίωσης το ρεύμα για ηλεκτρόνια και οπές είναι

$$J_p = -eD_p \left. \frac{d}{dx} \delta p(x) \right|_{x=x_n}, \quad J_n = eD_n \left. \frac{d}{dx} \delta n(x) \right|_{x=-x_p}.$$

- Η συνολική πυκνότητα ρεύματος είναι $J = J_n + J_p$.

Η επαφή p-n με την εφαρμογή πόλωσης (συνέχεια)

- Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σχέσεις καταλήγουμε ότι

$$J = J_n + J_p = eD_n \frac{d}{dx} \delta n(x) \Big|_{x=-x_p} - eD_p \frac{d}{dx} \delta p(x) \Big|_{x=x_n},$$

ή

$$I = J \cdot A = \left(\frac{eAD_n n_p}{L_n} + \frac{eAD_p p_n}{L_p} \right) (e^{\frac{V}{V_T}} - 1),$$

όπου L_n, L_p τα μέσα μήκη πριν την επανασύνδεση των φορέων μειονότητας στην περιοχή p και n αντίστοιχα. A είναι το εμβαδόν της επιφάνειας της επαφής.

- Η παραπάνω σχέση ισχύει και για ανάστροφη πόλωση της επαφής ($V < 0$ reverse bias). Τότε, η εκθετική συνάρτηση πηγαίνει πολύ γρήγορα στο μηδέν και επικρατεί το ανάστροφο ρεύμα κόρου, που είναι

$$I = -I_S = - \left(\frac{eAD_n n_p}{L_n} + \frac{eAD_p p_n}{L_p} \right)$$

- Είναι εμφανής οι ανορθωτικές ιδιότητες της επαφής p-n, μιας και για θετικά V το ρεύμα αυξάνεται εκθετικά, αλλά για αρνητικά V το ρεύμα γίνεται πολύ μικρό, ίσο με $-I_S$.

Χωρητικότητα αραίωσης ή χωρητικότητα επαφής

- Όταν η επαφή p-n είναι ανάστροφα πολωμένη σε τάση $-V_R$, τα αντίθετα φορτία της περιοχής αραίωσης δημιουργούν μια χωρητικότητα. Η εξάρτηση του φορτίου της περιοχής αραίωσης από την τάση είναι

$$Q = ex_nAN_D = A\sqrt{2e\epsilon_s \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} (V_{bi} + V_R)}.$$

ή

$$Q = Q_0 \sqrt{1 + \frac{V_R}{V_{bi}}}, \quad Q_0 = A\sqrt{2e\epsilon_s \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} V_{bi}}.$$

- Η μη γραμμική χωρητικότητα που υφίσταται είναι

$$C_j = \frac{dQ}{dV_R}.$$

Άρα

$$C_j = \frac{\frac{Q_0}{2V_{bi}}}{\sqrt{(1 + \frac{V_R}{V_{bi}})}} = \frac{C_{j0}}{\sqrt{(1 + \frac{V_R}{V_{bi}})}}.$$

- Η ιδιότητα αυτή των επαφών p-n χρησιμοποιείται στο στοιχείο varactor, που έχει μεταβλητή χωρητικότητα.

Χωρητικότητα διάχυσης επαφής p-n

- Το ρεύμα σε μια επαφή p-n οφείλεται στους πλεονάζοντες φορείς μειονότητας. Όταν αλλάζει η τάση ευθείας πόλωσης χρειάζεται κάποιος χρόνος για να αποκατασταθεί η steady state πυκνότητα των φορέων μειονότητας. Αυτό δημιουργεί χωρητική συμπεριφορά στην επαφή.
- Το φορτίο φορέων μειονότητας που είναι συγκεντρωμένο εκατέρωθεν της περιοχής απογύμνωσης είναι ίσο με το ρεύμα επί το χαρακτηριστικό μέσο χρόνο επανασύνδεσης των φορέων μειονότητας:

$$Q = \tau_p I_p + \tau_n I_n.$$

- Αν τ_T είναι ένας μέσος χρόνος επανασύνδεσης για τους φορείς μειονότητας, τότε

$$Q = \tau_T (I_p + I_n) = \tau_T I.$$

- Η μη γραμμική χωρητικότητα που υφίσταται είναι

$$C_d = \frac{dQ}{dV} = \frac{\tau_T}{V_T} I.$$

- Στην ανάστροφη λειτουργία η C_d είναι αμελητέα, λόγω του μικρού ρεύματος κόρου. Για να είναι μικρή η C_d γενικά, πρέπει να μειωθεί ο χρόνος τ_T .