

ΣΧΟΛΗ ΕΜΦΕ – ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ
Ημιαγωγοί και Ημιαγώγιμες Δομές (7^ο Εξάμηνο Σπουδών)

3^η Σειρά Ασκήσεων

Ι. Σ. Ράπτης

19/12/07

Επιστροφή μέχρι **10/01/08**

1. Ημιαγωγός, με ενεργειακό χάσμα 1.5 eV, ενεργό μάζα ηλεκτρονίων $m_e^* = 0.8m_0$, ενεργό μάζα οπών $m_h^* = 0.5m_0$, και σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 12$, έχει εμπλουτισθεί, ανομοιογενώς, με προσμίξεις τύπου «Δότες». **(α)** Να υπολογίσετε την ενεργειακή διαφορά του ελαχίστου της ζώνης αγωγιμότητας από την ενδοχασματική ενεργειακή κατάσταση των δοτών. **(β)** Να υποθέσετε ότι οι προσμίξεις κατανέμονται κατά βάθος (x) με συγκέντρωση $N(x) = N_0 e^{-ax}$, όπου $N_0 = 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, και $a = 4(\mu\text{m})^{-1}$, και να εξηγήσετε, με ποιοτικά επιχειρήματα ή με έναν υπολογισμό τάξης μεγέθους, ότι όλες οι προσμίξεις μπορούν να θεωρηθούν ιονισμένες. **(γ)** Θεωρήστε, με βάση το προηγούμενο συμπέρασμα, ότι η συγκέντρωση ηλεκτρονίων αλλάζει, με το βάθος, σύμφωνα με τη σχέση $n(x) = n_i + N_0 e^{-ax}$, όπου n_i η ενδογενής πυκνότητα φορέων, και υπολογίστε την κατά βάθος κατανομή οπών $p = p(x)$, σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. **(δ)** Υπολογίστε το ηλεκτρικό πεδίο $E = E(x)$, που προκύπτει ως αποτέλεσμα της ανομοιογενούς κατανομής φορέων σε θερμοδυναμική ισορροπία. **(ε)** Σχεδιάστε, σε ένα ποιοτικό σχεδιάγραμμα τις συναρτήσεις $n = n(x)$, $p = p(x)$, $E_C(x)$, $E_F(x)$, $E_i(x)$, $E_V(x)$, και το ηλεκτρικό πεδίο του ερωτήματος (γ).

② Ημιαγώγιμο υλικό της οικογένειας IV, με ενεργειακό χάσμα $E_g = 1.2 \text{ eV}$, σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 11$, και ενδογενή συγκέντρωση φορέων $n_i = 5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, φέρει ομοιόμορφη συγκέντρωση πρόσμειξης Αλουμινίου (Al, στήλη III του Περιοδικού Πίνακα) ίση προς 5×10^{17} (άτομα Al)/ cm^3 , σε όλο του τον όγκο. Στην μία επιφάνεια του ανωτέρω υλικού εμφυτεύουμε, επιπλέον, Αρσενικό (As, στήλη V του Περιοδικού Πίνακα), με ομοιόμορφη συγκέντρωση ίση προς 5.5×10^{17} (άτομα As)/ cm^3 , σε μία περιοχή μέχρι βάθος 0.5 μm . **(α)** Να εξηγήσετε ότι το τελικό αποτέλεσμα είναι μία επαφή p-n, και να υπολογίσετε το εσωτερικό δυναμικό της επαφής. **(β)** Να υπολογίσετε το συνολικό πλάτος της περιοχής απογύμνωσης καθώς και τα επί μέρους πλάτη των περιοχών απογύμνωσης εκατέρωθεν της επαφής. **(γ)** Να σχεδιάσετε ένα ενεργειακό διάγραμμα, υπό κλίμακα, του πρώτου 1 μm του συστήματος, από την πλευρά του υλικού που βρίσκεται η επαφή p-n, στο οποίο να φαίνονται όλα τα μεγέθη των ερωτημάτων (β) και (γ). $T = 300 \text{ K}$.

3. Ημιαγώγιμο υλικό, της οικογένειας III-V με ενεργειακό χάσμα $E_g = 1.3 \text{ eV}$ και σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r = 14$, έχει μέσες ενεργές μάζες, (της πυκνότητας καταστάσεων), οπών και ηλεκτρονίων, $m_p^* = 0.15m_0$ και $m_n^* = 0.6m_0$, αντίστοιχα. **(α)** Εξηγήστε γιατί η νόθευση ενός υλικού III-V, με προσμίξεις ατόμων της ομάδας IV, μπορεί να λειτουργήσει ως εμπλουτισμός με φορείς τύπου p ή τύπου n. **(β)** Να υπολογιστούν οι ενεργειακές στάθμες Δοτών και Αποδεκτών, σε αυτό το υλικό, και οι ενεργές πυκνότητες καταστάσεων στις στάθμες σθένους και αγωγιμότητας, σε θερμοκρασία δωματίου. Σχεδιάστε ένα ενεργειακό διάγραμμα, σημειώνοντας τις αποστάσεις όλων των ενεργειακών επιπέδων από το μέγιστο της ζώνης σθένους **(γ)** Στο υλικό υπάρχουν προσμίξεις οι οποίες λειτουργούν ως δότες. Εξηγήστε γιατί, στις χαμηλές θερμοκρασίες, η συγκέντρωση ηλεκτρονίων της ζώνης αγωγιμότητας προέρχεται κυρίως από τον ιονισμό των δοτών. **(δ)** Δεχτείτε ότι, στις χαμηλές θερμοκρασίες, η συγκέντρωση ηλεκτρονίων (n) της ζώνης αγωγιμότητας προέρχεται κυρίως από τον ιονισμό των δοτών (με συγκέντρωση N_D), σύμφωνα με τη σχέση

$$n = \sqrt{N_D N_C} / 2 \exp\left(-\frac{E_C - E_D}{2kT}\right). \text{ Προσδιορίστε τη μέγιστη συγκέντρωση προσμίξεων}$$

$N_{D,max}$ για την οποία εξασφαλίζεται ολικός ιονισμός τους ήδη από τη θερμοκρασία υγρού αζώτου ($T=80K$). **(ε)** Εκτιμήστε τη συγκέντρωση ενδογενών ηλεκτρονίων n_i , σε θερμοκρασία δωματίου, και το επίπεδο Fermi του υλικού, αν $N_D=1.98 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, κάνοντας εύλογες προσεγγίσεις. **(στ)** Εκτιμήστε από ποιά θερμοκρασία και πάνω ο ημιαγωγός συμπεριφέρεται ως ενδογενής, αν $N_D=1.98 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

4. α) Υποθέστε ότι οι ενεργές μάζες πυκνότητας καταστάσεων ηλεκτρονίων και οπών του πυριτίου (Si) και του γερμανίου (Ge) είναι της ίδιας τάξης μεγέθους, τα ενεργειακά τους χάσματα είναι 1.17eV και 0.66eV, αντίστοιχα, και η ενδογενής συγκέντρωση φορέων του πυριτίου, σε θερμοκρασία δωματίου είναι $n_i=1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$. **(α)** Εξηγήστε γιατί προσμείξεις Sb, σε συγκέντρωση 10^{12} cm^{-3} , καθιστούν, σε θερμοκρασία 300K, ημιαγωγό τύπου n το πυρίτιο αλλά όχι το γερμάνιο. **(β)** Υποθέστε ότι έχετε επαφή p-n πυριτίου με συγκεντρώσεις ολικά ιονισμένων προσμίξεων N_A και N_D , αντίστοιχα σε κάθε πλευρά. Να δείξετε ότι, για την περιοχή θερμοκρασιών όπου ισχύει η παραδοχή του ολικού ιονισμού των προσμίξεων, το εσωτερικό δυναμικό (ή δυναμικό διάχυσης, ή δυναμικό επαφής), V_0 , μίας επαφής p-n ενός ημιαγωγίμου υλικού, ικανοποιεί μία σχέση της μορφής $eV_0 = E_g + T(A - B \ln T)$, και να προσδιορισθούν οι συντελεστές A και B . συναρτήσει, των συγκεντρώσεων N_A και N_D , των ενεργών μαζών m_n^* και m_p^* , των παγκοσμίων σταθερών e (φορτίο ηλεκτρονίου), k (σταθερά του Boltzmann) και h (σταθερά του Planck), και της θερμοκρασίας T . **(γ)** Με βάση το ερώτημα (β), εξηγήστε αν το εσωτερικό δυναμικό, V_0 , εξαρτάται από τις ιδιότητες του ημιαγωγίμου υλικού, από τις ιδιότητες των προσμίξεων, ή και από τα δύο.

5. Επαφή p-n με διατομή 0.1 mm^2 , κατασκευάζεται από ημιαγωγίμο υλικό με σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r=10$, ενεργειακό χάσμα $E_g=1.2\text{eV}$, ενδογενή συγκέντρωση φορέων $n_i=2.2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$, σε θερμοκρασία δωματίου, και χαρακτηριστικά φορέων $\mu_p=500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_n=1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\tau_p=\tau_n=2.5 \mu\text{s}$. Θεωρείστε ότι το πηλίκο των ενεργών μαζών αγωγιμότητας είναι όσο και το πηλίκο των ενεργών μαζών πυκνότητας καταστάσεων. Η επαφή κατασκευάζεται νοθεύοντας τις περιοχές n και p, με προσμίξεις συγκεντρώσεων $N_D=5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $N_A=1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ αντίστοιχα, οι οποίες θεωρούνται ολικά ιονισμένες. **(α)** Να υπολογιστεί η ενεργός πυκνότητα καταστάσεων για τις ζώνες σθένους (N_V) και αγωγιμότητας (N_C). **(β)** Να σχεδιαστεί το ενεργειακό διάγραμμα της επαφής, σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, ($E_{i(p)}-E_F$, $E_F-E_{i(n)}$, δυναμικό επαφής). **(γ)** Να υπολογιστεί το εύρος της περιοχής απογύμνωσης (άντλησης), σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. **(δ)** Να υπολογιστεί το ρεύμα που διαρρέει την επαφή όταν είναι πολωμένη ευθέως με τάση 0.5 V.

6. Θεωρείστε γνωστό ότι σε έναν ημιαγωγό με συγκέντρωση προσμίξεων τύπου n ίση με N_d , η συγκέντρωση ιονισμένων δοτών, (σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπου $k_B T \ll |E_F - E_d|$), δίδεται από τη σχέση

$$N_d^+ \approx \frac{N_d}{2 \exp\left[\frac{(E_F - E_d)}{k_B T}\right]}, \text{ όπου } E_F \text{ το επίπεδο Fermi και } E_d \text{ η}$$

στάθμη ενέργειας δοτών, με αναφορά την ανώτατη ενέργεια της στάθμης σθένους. Συνδυάζοντας τη σχέση αυτή με το γεγονός ότι, στην ίδια περιοχή χαμηλών θερμοκρασιών, $n_i \ll N_d^+ / 2$, να υπολογίσετε : **(α)** τη συγκέντρωση ηλεκτρονίων (n), και **(β)** το επίπεδο Fermi (E_F), συναρτήσει της θερμοκρασίας και των N_C , N_d , E_C , E_d . **(γ)** Σε ποιά τιμή τείνει, για την παραπάνω περίπτωση, το επίπεδο Fermi, στο όριο $T \rightarrow 0$;