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

2^{η} Σειρά Ασκήσεων 7/11/08
Ι. Σ. Ράπτης **Επιστροφή μέχρι 7/01/09**

1. α) Αν υποθέσουμε ότι δύο ημιαγώγιμα υλικά, όπως τα Si και Ge, έχουν περίπου ίδιες τιμές πλεγματικής σταθεράς και περίπου ίδιες τιμές για την ενεργό μάζα των ηλεκτρονίων, αλλά διαφορετικές τιμές σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς, (ε_r(Si)=12, ε_r(Ge)=16), για τις προσμείξεις τίνος υλικού περιμένετε να ισχύει καλύτερα το απλό μοντέλο ενός υδρογονειδούς ατόμου του Bohr.
β) Ενας στοιχειακός ημιαγωγός, όπως οι παραπάνω, έχει πυκνότητα ενδογενών ηλεκτρονίων, σε θερμοκρασία δωματίου, $n_i=10^{11}$ cm^{-3}. Στον ημιαγωγό αυτόν προσθέτουμε ομοιόμορφα κατανεμημένες προσμείξεις, τύπου «δότες», με συγκέντρωση, $N_D=3\times10^{16}$ cm^{-3}, και τύπου «αποδέκτες», με συγκέντρωση $N_A=8\times10^{16}$ cm^{-3}. Να υπολογισθούν, σε θερμοκρασία δωματίου, οι συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων (n) και οπών (p), καθώς και η διαφορά E_F-E_V, του επιπέδου Fermi από την κορυφή της ζώνης σθένους, αν το ενεργειακό χάσμα του υλικού είναι 0.8 eV, και οι ενεργές μάζες πυκνότητας καταστάσεων είναι $m_n^*=m_0$ και $m_p^*=0.5m_0$.

2. Θεωρήστε γνωστό ότι η συγκέντρωση ατόμων πυριτίου, σε έναν καθαρό κρύσταλλο πυριτίου είναι 5×10^{22} cm^{-3}, η πυκνότητα ενδογενών φορέων σε θερμοκρασία δωματίου $n_i=1.45\times10^{10}$ cm^{-3}, ενώ οι κινητικότητες ηλεκτρονίων και οπών είναι μ_e=1350 cm^{2}V^{-1}s^{-1} και μ_h=450 cm^{2}V^{-1}s^{-1}, αντίστοιχα.
α) Δείξτε ότι, τόσο στην περίπτωση προσμίξεων τύπου n, (με συγκέντρωση N_D), όσο και (ανεξάρτητα) στην περίπτωση προσμίξεων τύπου p, (με συγκέντρωση N_A), μπορεί να προσδιορισθεί κατάλληλη συγκέντρωση προσμείξεων, ($N_{D,\text{κρίσιμη}}$= ; , ή $N_{A,\text{κρίσιμη}}$ = ; , αντίστοιχα), για την οποία το υλικό παρουσιάζει ελάχιστη αγωγιμότητα. Ποια είναι η τιμή της ελάχιστης αγωγιμότητας στις δύο περιπτώσεις;
β) Να υπολογιστεί η αντίσταση ενός κύβου $1\times1\times1$ cm^3 πυριτίου σε θερμοκρασία δωματίου όταν είναι: β_1) απολύτως καθαρός, β_2) όταν έχει προσμίξεις αρσενικού (As: της στήλης V του περιοδικού συστήματος) σε αναλογία ατόμων 1/10^9, β_3) όταν έχει προσμίξεις βορίου (B: της στήλης III του περιοδικού συστήματος) στην ίδια αναλογία ατόμων 1/10^9, ως προς το πυρίτιο.
[Σε όλους τους υπολογισμούς να θεωρηθεί ότι έχουμε ολικό ιονισμό προσμείξεων**]**

3. 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 $n_i=1.5\text{x}10^{10}$cm^{-3}. Εξηγείστε 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 προσμείξεων N_A και N_D, αντίστοιχα σε κάθε πλευρά. Εκφράστε την τάση επαφής συναρτήσει του ενεργειακού χάσματος E_g, των συγκεντρώσεων N_A και N_D, των ενεργών μαζών m_n^* και m_p^*, των παγκοσμίων σταθερών e (φορτίο ηλεκτρονίου), k(σταθερά του Bolzmann) και h (σταθερά του Planck), και της θερμοκρασίας T.

4. Ο λεγόμενος νόμος δράσης των μαζών, $np=n_i^2=N_VN_C\exp(-Eg/kT)$, ισχύει ανεξάρτητα από την προέλευση (ενδογενή ή εξωγενή) των ηλεκτρονίων και των οπών, με συγκεντρώσεις n και p, αντίστοιχα. α) Να υπολογίσετε τις ενδογενείς συγκεντρώσεις ηλεκτρονίων και οπών στο ομογενές πυρίτιο, σε θερμοκρασία 600K, οπότε το ενεργειακό του χάσμα έχει μειωθεί στο 1eV. β) Να υπολογίσετε τις συγκεντρώσεις φορέων, για πυρίτιο με ομογενείς προσμείξεις

δοτών και αποδεκτών, σχεδόν ολικά ιονισμένων, ($N_D \approx N_D^+$, και $N_A \approx N_A^-$, αντίστοιχα) όπου N_D-N_A=Δn=(5×10^{16} -1×10^{16}) cm^{-3}. γ) Να υπολογίσετε την τιμή της στάθμης Fermi, σε θερμοκρασία 600K, ως προς το μέγιστο της ζώνης αγωγιμότητας, για τις περιπτώσεις (α) και (β), αντίστοιχα.

<u>Δίδονται, για το πυρίτιο σε θερμοκρασία δωματίου (kT≈26meV):</u>

Ενεργειακό χάσμα= 1.1 eV, Ενεργές πυκνότητες κβαντικών ενεργειακών καταστάσεων: (Ζώνη Σθένους)= $1.\times10^{19}$ cm^{-3}, (Ζώνη Αγωγιμότητας)=$2.4\times10^{19}cm^{-3}$,

5. Ημιαγωγός τύπου IV έχει, σε T=300K, ενεργειακό χάσμα E_g=1.2 eV, και ενεργές πυκνότητες καταστάσεων: $N_V = 1\times10^{19}\,cm^{-3}$, $N_C = 4\times10^{19}\,cm^{-3}$. Η ενδοχασματική κατάσταση προσμείξεων τύπου αποδέκτη απέχει 37.5 meV από το μέγιστο της ζώνης σθένους, και η συγκέντρωση προσμείξεων-αποδεκτών είναι $N_A = 2\times10^{16}\,cm^{-3}$. (α) Δείξτε ότι σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπου $kT << E_A - E_F$, η συγκέντρωση φορέων τύπου p δίνεται, με καλή προσέγγιση, από τη σχέση $p = \sqrt{\frac{N_V N_A}{2}} \exp\left(-\frac{E_A - E_V}{2kT}\right)$. (β) Συνδυάζοντας το προσεγγιστικό αποτέλεσμα του ερωτήματος (α) με την γενική μορφή της πυκνότητας φορέων τύπου p, εκφράστε, για το παραπάνω σύστημα, την τιμή του επιπέδου Fermi, σε χαμηλές θερμοκρασίες, συναρτήσει των T, N_V, E_V, N_A, E_A. (γ) Προσδιορίστε, για το ίδιο σύστημα, την οριακή τιμή του επιπέδου Fermi, όταν η θερμοκρασία τείνει στους 0^oK. (δ) Δείξτε ότι, απουσία προσμείξεων, η οριακή τιμή του επιπέδου Fermi, σε χαμηλές θερμοκρασίες, τείνει στο μέσον του ενεργειακού χάσματος. (ε) Σχολιάστε τα αποτελέσματα των ερωτημάτων (γ) και (δ).

6. Επαφή p-n με διατομή 0.1 mm^2, κατασκευάζεται από ημιαγώγιμο υλικό με σχετική διηλεκτρική σταθερά ε_r=10, ενεργειακό χάσμα E_g=1.17eV, ενδογενή συγκέντρωση φορέων n_i=$2.2x10^9cm^{-3}$, σε θερμοκρασία δωματίου, ευκινησίες φορέων μ_p=500 cm^2/Vs, μ_n=1500 cm^2/Vs, ίδιο μέσο ελεύθερο χρόνο μεταξύ κρούσεων, (της τάξης του 10^{-12} s), καθώς και ίδιο χρόνο ζωής, τ_p=τ_n=2.5 μs, (από την διέγερση-δημιουργία, μέχρι της επανασύνδεση) των φορέων μειονότητας. 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=$5x10^{15}$ cm^{-3}, N_A=$1.5x10^{16}cm^{-3}$ 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, (υπολογισμός και αναγραφή τών $E_{i(p)}$-E_F, E_F-$E_{i(n)}$, δυναμικό επαφής). **(γ)** Να υπολογιστεί το εύρος της περιοχής απογύμνωσης (άντλησης), σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας.

7. Ημιαγώγιμο υλικό της οικογένειας IV, με ενεργειακό χάσμα E_g=1.2eV, σχετική διηλεκτρική σταθερά ε_r=11, και ενδογενή συγκέντρωση φορέων n_i=$5\times10^{10}cm^{-3}$, φέρει ομοιόμορφη συγκέντρωση πρόσμειξης Αλουμινίου ίση προς 5×10^{17} (άτομα Al)/cm^3, σε όλο του τον όγκο. Στην μία επιφάνεια του ανωτέρω υλικού εμφυτεύουμε, επιπλέον, Αρσενικό, με ομοιόμορφη συγκέντρωση ίση προς 5.5×10^{17} (άτομα As)/cm^3, σε μία περιοχή μέχρι βάθος 0.5μm. **(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 (α) και (β). T=300K.