

ΣΧΟΛΗ ΕΜΦΕ – ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΚΑΝΟΝΙΚΕΣ ΕΞΕΤΑΣΕΙΣ ΧΕΙΜΕΡΙΝΟΥ ΕΞΑΜΗΝΟΥ 2007-08
Ημιαγωγοί και Ημιαγώγιμες Δομές (7^ο Εξάμηνο Σπουδών)

Συνολική Διάρκεια εξέτασης 2,5 ώρες

Δ. Παπαδημητρίου, Ι. Σ. Ράπτης

- 1) Απαντήστε σε 2 θέματα, από τα (1, 2, 3), και στα 4 και 5
- 2) Επιτρέπεται μόνο η χρήση του φυλλαδίου με τις βασικές σχέσεις, που αφορούν το πρώτο μέρος του μαθήματος, και το οποίο διανέμεται μαζί με τα θέματα

Θέμα 1. Ημιαγωγός τύπου IV έχει, σε $T=300\text{K}$, ενεργειακό χάσμα $E_g=1.2\text{ eV}$, και ενεργές πυκνότητες καταστάσεων: $N_V = 1 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$, $N_C = 4 \times 10^{19}\text{ cm}^{-3}$. Η ενδοχασματική κατάσταση προσμείξεων τύπου αποδέκτη απέχει 37.5 meV από το μέγιστο της ζώνης σθένους, και η συγκέντρωση προσμείξεων-αποδεκτών είναι $N_A = 2 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$. (α) Δείξτε ότι σε χαμηλές θερμοκρασίες, όπου $kT \ll E_A - E_F$, 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°K . (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).

Θέμα 2. Εστω ότι $E_{\text{κενού}}$ είναι η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου που έχει εξαχθεί από ένα υλικό (μέταλλο ή ημιαγωγό) και έχει μηδενική ταχύτητα. Ορίζουμε ως έργο εξαγωγής Φ του αντίστοιχου υλικού την διαφορά $\Phi \equiv E_{\text{κενού}} - E_{\text{Fermi}}$. Στην περίπτωση του ημιαγωγού ορίζουμε, επιπλέον, ως ηλεκτρική συγγένεια χ την διαφορά $\chi \equiv E_{\text{κενού}} - E_C$, όπου E_C το ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας. Θεωρήστε ότι έχετε δημιουργήσει μία ετεροεπαφή ανάμεσα σε ένα μέταλλο και σε έναν ημιαγωγό τύπου- n , με αντίστοιχα έργο εξαγωγής Φ_m και Φ_n , και ηλεκτρική συγγένεια χ . (α) Διατυπώστε τους βασικούς κανόνες που ισχύουν, για τα ενεργειακά μεγέθη, κατά τον σχηματισμό της επαφής. (β) Σχεδιάστε ένα ενεργειακό διάγραμμα της ετεροεπαφής, σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, για την περίπτωση $\Phi_m > \Phi_n$, σημειώνοντας όλα τα ενεργειακά μεγέθη, και εξηγήστε αν έχουμε ωμική επαφή ή φραγμό Schottky. (γ) Σχεδιάστε ένα ενεργειακό διάγραμμα της ετεροεπαφής, σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, για την περίπτωση $\Phi_m < \Phi_n$, σημειώνοντας όλα τα ενεργειακά μεγέθη, και εξηγήστε αν έχουμε ωμική επαφή ή φραγμό Schottky. (δ) Εξηγήστε σε λίγες γραμμές, και με τη βοήθεια ενός ενεργειακού διαγράμματος, τη λειτουργία μία ηλιακής κυψελίδας που αποτελείται από μία λεπτή (φωτοδιαπερατή) μεταλλική επίστρωση, σε επαφή τύπου Schottky, με έναν ημιαγωγό τύπου- n .

Θέμα 3. Επαφή $p-n$ αποτελείται από ημιαγωγό ενεργειακού χάσματος $E_g = 1.2\text{ eV}$, σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς $\epsilon = 12$, και ενεργές πυκνότητες καταστάσεων: $N_V = 8 \times 10^{18}\text{ cm}^{-3}$, $N_C = 4 \times 10^{17}\text{ cm}^{-3}$. Οι δύο πλευρές της επαφής έχουν δημιουργηθεί με προσμείξεις των οποίων οι συγκεντρώσεις είναι $N_A = 5 \times 10^{14}\text{ cm}^{-3}$ και $N_D = 1 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$, αντίστοιχα.

(α) Να υπολογιστεί η απόσταση του επιπέδου Fermi από το μέγιστο της ζώνης σθένους, σε κάθε μία από τις δύο περιοχές p και n , υποθέτοντας ότι και οι δύο περιοχές έχουν χαρακτηριστικά εξωγενούς ημιαγωγού, και ότι έχουμε ολικό ιονισμό των προσμείξεων. (β) Να υπολογιστεί η συγκέντρωση φορέων μειοψηφίας σε κάθε περιοχή. (γ) Να υπολογιστεί το δυναμικό επαφής. (δ) Να υπολογιστεί το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης. (ε) Να υπολογιστεί το επιμέρους πλάτος της περιοχής απογύμνωσης, σε κάθε πλευρά της επαφής. (στ) Σχεδιάστε, υπό κλίμακα, ενεργειακό διάγραμμα της επαφής, για την έκταση των $\pm 2\mu\text{m}$ περί το επίπεδο της μεταλλουργικής επαφής. Θεωρήστε ότι το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας σε $T=300\text{K}$.

Θέμα 4. α) Να περιγράψετε τη δομή της ανώτατης ζώνης σθένους ενός μεμονωμένου κβαντικού πηγαδιού από ημιαγώγιμα υλικά με δομή θειούχου ψευδαργύρου.

β) Να υπολογίσετε την ενεργειακή θέση των δύο ανωτέρων υποζωνών της ζώνης σθένους σε κβαντικό πηγάδι $\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}-\text{GaAs}-\text{Ga}_{0.7}\text{Al}_{0.3}\text{As}$ με πέντε ατομικές στρώσεις GaAs.

γ) Να περιγράψετε (ποιοτικά) τις διαδικασίες απορρόφησης/εκπομπής που μπορούν να παρατηρηθούν σ' αυτή την ημιαγώγιμη δομή.

Δίνονται:

$$E_g(\text{bulk-GaAs}) = 1.424 \text{ eV}$$

$$E_g(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}) = (1.42 + 1.26x) \text{ eV}, x < 0.45,$$

$$\alpha(\text{GaAs}) = 5.653 \text{ \AA}$$

$$m_e = 0.911 \times 10^{-30} \text{ kg},$$

$$\text{GaAs: } m_e^* = 0.067m_e, m_{hh}^* = 0.51m_e, m_{lh}^* = 0.082m_e,$$

Θέμα 5. α) Σε σύγκριση με τις ενεργειακές στάθμες ενός απλού (μεμονωμένου) κβαντικού πηγαδιού, ποιο αποτέλεσμα έχει (σε μία δομή πολλαπλών κβαντικών πηγαδιών) η αλληλεπίδραση ενός κβαντικού πηγαδιού με τα γειτονικά του;

β) Να περιγράψετε (με τη βοήθεια διαγράμματος) τη μεταβολή στις ενέργειες των ηλεκτρονίων μη αλληλεπιδρώντων κβαντικών πηγαδιών (πεπερασμένου βάθους) με την προοδευτική μείωση του εύρους του φράγματος και τη μετάβαση σε υπερδομή (superlattice).

γ) Πως ορίζεται η νέα περιοδικότητα του πλέγματος σε αλληλεπιδρώντα κβαντικά πηγάδια εύρους d ;

Δίνονται:

$$\text{Φορτίο ηλεκτρονίου: } e = 1,610 \cdot 10^{-19} \text{ C, Ταχύτητα φωτός στο κενό: } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$\text{Διηλεκτρική σταθερά του κενού: } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ (C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}\text{)} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ (F/m)}$$

$$\text{Σταθερά του Planck: } h = 4.14 \cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s} = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s},$$

$$kT(300\text{K}) \approx 25 \text{ meV}, \quad 1\text{eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$