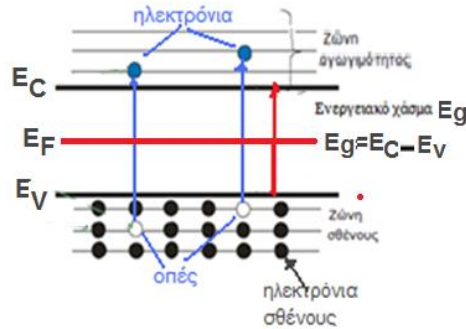




Ενδογενείς ή Αμιγείς (καθαροί) ημιαγωγοί

Διάγραμμα Ενεργειακών Ζωνών



Άσκηση 1. Να υπολογίσετε την πιθανότητα που έχει ένα ηλεκτρόνιο στους 27^0 C να αποκτήσει την απαιτούμενη ενέργεια για να διεγερθεί από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας στους καθαρούς ημιαγωγούς: α) διαμάντι β) πυρίτιο γ) γερμάνιο. Το E_g στο διαμάντι είναι 5,4 eV, στο πυρίτιο 1,1 eV, στο γερμάνιο 0,67 eV.

Λύση

Η πιθανότητα να βρεθεί ένα ηλεκτρόνιο στην ενεργειακή κατάσταση E_C στη ζώνη αγωγιμότητας υπολογίζεται από τη συνάρτηση κατανομής Fermi-Dirac:

$$F(E_C) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E_C - E_F}{kT}\right]}$$

Επειδή $E_g = E_C - E_V$ για $E_V = 0 \Rightarrow E_g = E_C$. Το ενεργειακό επίπεδο Fermi E_F για κάθε υλικό βρίσκεται στο μέσον του ενεργειακού χάσματος, οπότε $E_F = E_g/2$. Έτσι:

α) Στο διαμάντι το $E_g = 5,4$ eV, οπότε έχουμε:

$$F(E_C) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{2,7}{0,025}\right]} = \frac{1}{1 + \exp(108)} = 1,2 \cdot 10^{-47}$$

β) Στο πυρίτιο το $E_g = 1,1$ eV και έχουμε $F(E_C) = 2,5 \cdot 10^{-10}$

γ) Στο γερμάνιο το $E_g = 0,67$ eV και έχουμε $F(E_C) = 1,5 \cdot 10^{-6}$

Παρατηρούμε ότι στο διαμάντι η πιθανότητα είναι μηδενική και συμπεριφέρεται ως μονωτής. Στο πυρίτιο και το γερμάνιο η πιθανότητα είναι μικρή και συμπεριφέρονται ως ημιαγωγοί.

Άσκηση 2. Να υπολογίσετε για το Ge: α) τη συγκέντρωση (δηλ. πυκνότητα) των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας στους 20^0 C, β) το κλάσμα της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας προς τη συγκέντρωση που αντιστοιχεί στο



συνολικό αριθμό ηλεκτρονίων στη ζώνη σθένους. Δίνονται: $\sigma=2\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$, $E_g=0,67\text{eV}$, $\mu_e=0,38\text{m}^2(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$, $\mu_h=0,182\text{m}^2(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$, $2kT=0,05\text{eV}$ στους 20°C , σταθερά πλέγματος του Ge, $a=5,6575\cdot 10^{-10}\text{m}$.

Λύση

$$n_i = \frac{\sigma}{e(\mu_e + \mu_h)} = \frac{2}{1,6\cdot 10^{-19}(0,38 + 0,182)} = 2,22\cdot 10^{19}\text{ ηλεκτρόνια}/\text{m}^3$$

Συνεπώς υπάρχουν $2,22\cdot 10^{19}$ ελεύθερα ηλεκτρόνια/ m^3 στη ζώνη αγωγιμότητας και ισάριθμες ελεύθερες οπές, $2,22\cdot 10^{19}$ οπές/ m^3 στη ζώνη σθένους. Ο συνολικός αριθμός ηλεκτρονίων στη ζώνη σθένους (ηλεκτρόνια σθένους που συμμετέχουν στους ομοιοπολικούς δεσμούς) του Ge είναι ίσος με το γινόμενο του συνολικού αριθμού ατόμων/ cm^3 επί το σθένος:

$$\text{Συνολικός αριθμός ηλεκτρονίων}/\text{m}^3 = \frac{(8\text{ άτομα}/\text{κυψελίδα}) \cdot (4\text{ ηλεκτρόνια}/\text{άτομο})}{(5,6575\cdot 10^{-10}\text{m})^3} = 0,175\cdot 10^{30}\text{ ηλεκτρόνια}/\text{m}^3$$

$$\text{Κλάσμα διεγερμένων ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας} = \frac{2,22\cdot 10^{19}}{0,175\cdot 10^{30}} = 1,24\cdot 10^{-10}$$

Άσκηση 3. Να υπολογίσετε την ενδογενή συγκέντρωση n_i και την ενδογενή ειδική αντίσταση στο Si στους 300K . Οι τιμές της ενεργού μάζας των ηλεκτρονίων m_e^* και των οπών m_h^* είναι $1,08m_0$ και $0,56m_0$, αντίστοιχα και το ενεργειακό χάσμα $E_g=1,1\text{eV}$.

Λύση

$$N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* k T}{h^2} \right)^{3/2} = 2 \left(\frac{2\pi \times (1,08 \times 9,1 \times 10^{-31}\text{Kg})(1,38 \times 10^{-23}\text{JK}^{-1})(300\text{K})}{(6,63 \times 10^{-34}\text{Js})^2} \right)^{3/2}$$

$$= 2,8 \times 10^{25}\text{m}^{-3} = 2,8 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$$

$$N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* k T}{h^2} \right)^{3/2} = 2 \left(\frac{2\pi \times (0,56 \times 9,1 \times 10^{-31}\text{Kg})(1,38 \times 10^{-23}\text{JK}^{-1})(300\text{K})}{(6,63 \times 10^{-34}\text{Js})^2} \right)^{3/2}$$

$$= 1,05 \times 10^{25}\text{m}^{-3} = 1,05 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$$

$$n_i = (N_c N_v)^{1/2} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) = [(2,8 \times 10^{19})(1,05 \times 10^{19})]^{1/2} \exp\left(\frac{-1,10}{2 \times 0,0259}\right) = 1,02 \times 10^{10}\text{cm}^{-3}$$

$$\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h) = en_i(\mu_e + \mu_h)$$

$$= (1,6 \times 10^{19}\text{C})(1,02 \times 10^{10}\text{cm}^{-3})(1350 + 450\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}) = 2,9 \times 10^{-6}(\Omega\text{cm})^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 3,5 \times 10^5\ \Omega\text{cm}$$



Άσκηση 4. Να υπολογίσετε το n_i στους 450K για το GaAs με βάση τα δεδομένα $N_C = 4,7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, $N_V = 7,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $E_g = 1,42 \text{ eV}$, $n_i(300\text{K}) = 1,8 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$.

Λύση

Οι τιμές του kT και του γινομένου ($N_C \cdot N_V$) στους 450K είναι:

$$kT = 450 \times 8,62 \times 10^{-5} = 0,03879 \text{ eV}, \text{ και } N_C \cdot N_V = (4,7 \times 10^{17})(7,0 \times 10^{18}) \left(\frac{450}{300}\right)^3$$

$$n_i^2 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) = (4,7 \times 10^{17})(7,0 \times 10^{18}) \left(\frac{450}{300}\right)^3 \exp\left(\frac{-1,42}{0,03879}\right) = 1,40 \times 10^{21} \text{ cm}^{-6}$$

$$n_i = 3,74 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

το n_i στους 300K είναι $1,8 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$, συνεπώς αυξήθηκε πάνω από 4 τάξεις μεγέθους για αύξηση της θερμοκρασίας των 150K

Άσκηση 5. Να υπολογίσετε τη μέση ελεύθερη διαδρομή l_e , το μέσο ελεύθερο χρόνο τ_e για τα ηλεκτρόνια σε δείγμα πυριτίου n τύπου, και για τις οπές σε δείγμα p τύπου πυριτίου.

$$m_e^* = 1,18 m_0, \quad m_h^* = 0,59 m_0, \quad \mu_e = 0,15 \text{ m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s}), \quad \mu_h = 0,0458 \text{ m}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$$

$$\tau_e = \frac{\mu_e m_e^*}{q} = 10^{-12} \text{ s}, \quad \tau_h = \frac{\mu_h m_h^*}{q} = 1,54 \times 10^{-13} \text{ s}$$

$$v_{th_{elec}} = 1,08 \times 10^5 \text{ m/s}, \quad v_{th_{hole}} = 1,052 \times 10^5 \text{ m/s}$$

$$l_e = v_{th_{elec}} \tau_e = (1,08 \times 10^5 \text{ m/s})(10^{-12} \text{ s}) = 10^{-7} \text{ m}$$

$$l_h = v_{th_{hole}} \tau_h = (1,052 \times 10^5 \text{ m/s})(1,54 \times 10^{-13} \text{ s}) = 2,34 \times 10^{-8} \text{ m}$$

Παρατηρούμε ότι $l_e > l_h$

Άσκηση 6. Η ειδική αντίσταση του γερμανίου στους 20°C είναι 50 Ωcm. Πόση είναι στους 40°C;

Απάντηση (20Ωcm)

Εξωγενείς ημιαγωγοί

Άσκηση 7. Να υπολογίσετε την πιθανότητα η E_C της ζώνης αγωγιμότητας να είναι κατειλημμένη από ένα ηλεκτρόνιο σε ημιαγωγό πυριτίου τύπου n στους $T = 300\text{K}$. Να βρείτε τη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων. Δίνεται ότι η στάθμη Fermi είναι 0,25 eV κάτω από τη ζώνη αγωγιμότητας και $N_C = 2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ στους 300K.

Λύση



Η πιθανότητα να είναι κατειλημμένη η ενεργειακή κατάσταση E_C από ένα ηλεκτρόνιο είναι:

$$F(E_C) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E_C - E_F}{kT}\right]} \cong \exp\left[-\frac{E_C - E_F}{kT}\right] = \exp\left[\frac{-0,25}{0,0259}\right] = 6,43 \times 10^{-5}$$

$$n = N_C e^{-\left(\frac{E_C - E_F}{kT}\right)} = (2,8 \times 10^{19}) e^{\left(\frac{-0,25}{0,0259}\right)} = 1,8 \times 10^{15} \text{ ηλεκτρόνια / cm}^3$$

Άσκηση 8. Πλακίδιο πυριτίου περιέχει προσμίξεις από άτομα δοτών σε (ομοιόμορφη) συγκέντρωση $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ (είναι νοθευμένο μόνο με πεντασθενή άτομα φωσφόρου), έχει διαστάσεις μήκος $L=3\text{mm}$ και εμβαδό διατομής $A=50 \times 100 \mu\text{m}$, και είναι σε θερμοκρασία δωματίου. Να αιτιολογήσετε τι τύπου είναι ο ημιαγωγός και ποιοί είναι οι φορείς πλειονότητας και μειονότητας. Να υπολογίσετε τη συγκέντρωση των φορέων, την αγωγιμότητα και την τάση κατά μήκος του πλακιδίου όταν διαρρέεται από ρεύμα έντασης $I=1\mu\text{A}$ (Δίνονται τιμές: ευκινησία ηλεκτρονίων $\mu = 1,5 \times 10^3 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, ενδογενής συγκέντρωση ηλεκτρονίων $n_i = 1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$).

Λύση

Το πλακίδιο περιέχει δότες δηλαδή πεντασθενή άτομα σε συγκέντρωση $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Σε θερμοκρασία δωματίου όλα τα άτομα έχουν ιονιστεί. Κάθε ιονισμένο άτομο δότη δίνει ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας, οπότε έχουμε $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ηλεκτρόνια από τους δότες που είναι περισσότερα από τα ενδογενή ηλεκτρόνια και οπές που προκύπτουν από το σπάσιμο των ομοιοπολικών δεσμών μεταξύ των ατόμων πυριτίου. Υπάρχει περίσσεια ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας (αρνητικό φορτίο) σε σχέση με τις οπές στη ζώνη σθένους (θετικό φορτίο), δηλαδή $n \gg p$. Επομένως οι φορείς πλειονότητας είναι τα ηλεκτρόνια και οι φορείς μειονότητας οι οπές, και το πλακίδιο είναι n τύπου (το n προέρχεται από τα αρχικά negative). Πιο αναλυτικά βλέπε βιβλίο ή διαφάνειες μαθήματος.

φορείς πλειονότητας ηλεκτρόνια: $n = N_D = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, επειδή $N_D \gg n_i$

$$\text{φορείς μειονότητας οπές: } p \cdot n = n_i^2 \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{n} \Rightarrow p = \frac{(1,45 \times 10^{10})^2}{5 \times 10^{14}} = 4,2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$\sigma = e \cdot (n \mu_e + p \mu_h), \text{ επειδή } n \gg p, \sigma = q n \mu_e = 1,6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^{14} \times 1,5 \times 10^3 = 0,12 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$$

$$J = \sigma \cdot E, E = \frac{V}{L} \Rightarrow V = \frac{J}{\sigma} L = \frac{I L}{A \sigma} = 0,05 \text{ V}$$

Άσκηση 9. Ένα δείγμα πυριτίου περιέχει προσμίξεις φωσφόρου σε (ομοιόμορφη) συγκέντρωση $N_D = 1,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ και είναι σε θερμοκρασία δωματίου. α) Να αιτιολογήσετε τι τύπου είναι ο ημιαγωγός, ποιοί είναι οι φορείς πλειονότητας και



μειονότητας και να βρείτε τη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων και οπών. β) Να υπολογίσετε τη θέση της στάθμης Fermi ως προς τον πυθμένα της ζώνης αγωγιμότητας στους 25°C. γ) Να υπολογίσετε την ειδική αντίσταση. Δίνονται: $N_C=2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $n_i=1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, $E_g=1,1 \text{ eV}$.

Λύση

α) Το δείγμα είναι n τύπου. Οι φορείς πλειονότητας είναι τα ηλεκτρόνια και οι φορείς μειονότητας οι οπές (αιτιολόγηση όπως στην προηγούμενη άσκηση).

$$\text{φορείς πλειονότητας: ηλεκτρόνια } n = N_D = 1,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$\text{φορείς μειονότητας: οπές } p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{(1,45 \times 10^{10})^2}{1,5 \times 10^{15}} = \frac{2,1 \times 10^{20}}{1,5 \times 10^{15}} = 1,4 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

β) Για να βρούμε τη θέση της στάθμης Fermi χρησιμοποιούμε τη σχέση:

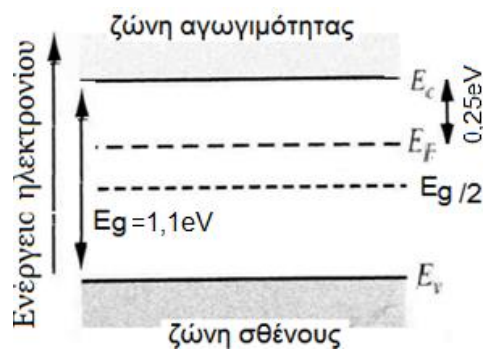
$$n \cong N_D = N_C e^{-\left(\frac{E_C - E_F}{kT}\right)} \text{ ηλεκτρόνια /cm}^3$$

$$T = 273 + 25 = 298 \text{ K} \quad \text{και } N_D \gg n_i$$

$$E_C - E_F = kT \ln \frac{N_C}{N_D} = 0,0256 \ln \frac{2,8 \times 10^{19}}{1,5 \times 10^{15}} \text{ eV}$$

$$E_C - E_F = 0,0256 \ln(1,8 \times 10^4) \Rightarrow E_C - E_F = 0,25 \text{ eV}$$

Δηλαδή η στάθμη Fermi E_F βρίσκεται κατά 0,25eV κάτω από την ενεργειακή στάθμη E_C (άκρο) της ζώνης αγωγιμότητας



Απεικόνιση της ενεργειακής στάθμης E_F , δηλαδή της στάθμης Fermi, μέσα στο ενεργειακό χάσμα, E_g , σε ημιαγωγό τύπου n.

γ) Προσοχή. Η ευκινησία των ηλεκτρονίων και οπών στον νοθευμένο ημιαγωγό είναι μικρότερη απ' αυτήν στον καθαρό ημιαγωγό, επειδή αυτά σκεδάζονται και με τα ιονισμένα άτομα των δοτών (στο καθαρό υλικό σκεδάζονται μόνο από τις ταλαντώσεις των μητρικών ατόμων). Έτσι στην περίπτωσή μας, η ευκινησία των ηλεκτρονίων είναι $1050 \text{ V}(\text{cm} \cdot \text{s})^{-1}$.



Από τη σχέση για την αγωγιμότητα $\sigma = e \cdot (n\mu_e + p\mu_h)$ επειδή $n \gg p$ παίρνουμε τη σχέση: $\sigma_e = en\mu_e$ και με αντικατάσταση

$$\sigma_e = 1,6 \times 10^{-19} \cdot 1,5 \times 10^{15} \cdot 1050 = 0,25 \text{ (}\Omega\text{cm)}^{-1}$$

$$\text{οπότε } \rho = \frac{1}{0,25} = 4 \Omega\text{cm}$$

Παρατηρούμε ότι με την προσθήκη $10^{15} / \text{cm}^3$ άτομα φωσφόρου η ειδική αντίσταση μειώνεται κατά πέντε τάξεις περίπου σε σύγκριση με το καθαρό πυρίτιο.

10. Παράδειγμα υπολογισμού με μερική αντιστάθμιση προσμίξεων: Σε δείγμα ημιαγωγού από πυρίτιο ντοπαρισμένο αρχικά με 10^{17} άτομα B/cm³ (το άτομο βορίου B είναι τρισθενές) εισάγουμε προσμίξεις από πεντασθενή άτομα αρσενικού σε συγκέντρωση 9×10^{16} άτομα As/cm³. α) Να αιτιολογήσετε τι τύπου είναι ο ημιαγωγός και ποιό είναι οι φορείς πλειονότητας και μειονότητας. β) Να υπολογιστεί η συγκέντρωση των φορέων πλειονότητας και μειονότητας στους 300K. Η ενδογενής συγκέντρωση φορέων είναι $n_i = p_i = 1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

Λύση

Η αρχική συγκέντρωση των ατόμων αποδέκτη είναι $N_A = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ και στη συνέχεια εισάγουμε νόθευση αντιστάθμισης και συγκεκριμένα η συγκέντρωση των ατόμων δότη είναι $N_D = 9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, μικρότερη από την N_A . Σε θερμοκρασία δωματίου όλα τα άτομα έχουν ιονιστεί. Η αρχική νόθευση αποδεκτών αντισταθμίζεται μερικώς από τη νόθευση με δότες και μέσω της αντιστάθμισης των προσμίξεων προκύπτει ότι έχουμε μία περίσσεια αποδεκτών $N_{A, \text{ ενεργός}}$ που είναι:

$$N_{A, \text{ ενεργός}} = N_A - N_D = 10^{17} - 9 \times 10^{16} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

οπότε η συγκέντρωση της περισσειας των αποδεκτών είναι 10^{16} cm^{-3} και το δείγμα παραμένει τύπου p. Επειδή ισχύει $N_{A, \text{ ενεργός}} \gg n_i$, η συγκέντρωση των οπών p (θετικό φορτίο) που είναι φορείς πλειονότητας είναι:

$$p = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων n (αρνητικό φορτίο) που είναι φορείς μειονότητας, προκύπτει από τη σχέση δράσης των μαζών $n \cdot p = n_i^2$. Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων n_i του ενδογενούς Si στους 300K είναι $n_i = 1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ άρα

$$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{2,1 \times 10^{20}}{10^{16}} = 2,1 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

Όπως προκύπτει από τους υπολογισμούς η συγκέντρωση των οπών είναι πολύ μεγαλύτερη από των ηλεκτρονίων και το δείγμα είναι τύπου p.

11. Παράδειγμα κατασκευής διατάξεων με αντιστάθμιση προσμίξεων: Θεωρείστε ημιαγωγό πυρίτιο στους 300K με ομοιόμορφη νόθευση, ο οποίος περιέχει πεντασθενή άτομα αντιμονίου σε συγκέντρωση $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ άτομα Sb/cm³, (δηλαδή η συγκέντρωση των δοτών είναι $N_D = 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$). Ο ημιαγωγός αυτός κατόπιν



νοθεύεται με $3,5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ άτομα βορίου/ cm^3 (δηλαδή η συγκέντρωση των αποδεκτών είναι $N_A = 3,5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$). α) Να αιτιολογήσετε τι τύπου είναι ο ημιαγωγός και ποιοί είναι οι φορείς πλειονότητας και μειονότητας. Να υπολογίσετε τη συγκέντρωση των φορέων και τη θέση της στάθμης Fermi ως προς το άκρο της ζώνης σθένους στους 25°C β) την ειδική αντίσταση. Δίνονται: $N_V = 1,04 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, $\mu_h = 1000 \text{cm}^2(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$ $n_i = 1,45 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$.

Λύση

α) Η αρχική νόθευση αντισταθμίζεται πλήρως, και μέσω της αντιστάθμισης των προσμίξεων, ο ημιαγωγός μετατρέπεται από τύπου n σε τύπου p, δηλαδή έχει περίσσεια αποδεκτών. Η ενεργός συγκέντρωση αποδεκτών είναι:

$$N_{A,\text{ενεργός}} = N_A - N_D = 3,5 \times 10^{16} - 2 \times 10^{16} = 1,5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$$

Οι φορείς πλειονότητας είναι οι οπές και επειδή $N_{A,\text{ενεργός}} \gg n_i$

$$p = 1,5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$$

Οι φορείς μειονότητας είναι τα ηλεκτρόνια: $n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{2,1 \times 10^{20}}{1,5 \times 10^{16}} = 1,4 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$

Η θέση της στάθμης Fermi υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_F - E_V = kT \ln \frac{N_V}{N_A} = 0,0256 \ln \frac{1,04 \times 10^{19}}{1,5 \times 10^{16}} = 0,17 \text{eV}$$

β) $\sigma = e \cdot (n\mu_e + p\mu_h)$ επειδή $p \gg n$ παίρνουμε τη σχέση: $\sigma = ep\mu_h$

Προσοχή Στην περίπτωση της αντιστάθμισης προσμείξεων, οι οπές που είναι οι φορείς πλειονότητας υφίστανται σκεδάσεις από τα συνολικά ιονισμένα άτομα προσμίξεων καθώς και από τις ταλαντώσεις των μητρικών ατόμων. Τα συνολικά ιονισμένα άτομα είναι:

$$N_{\text{ολικό}} = N_A + N_D = 3,5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} + 2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} = 5,5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$$

Ως εκ τούτου η ευκινησία των οπών θα μειωθεί στα $1000 \text{cm}^2(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$ περίπου.

Οπότε θα έχουμε:

$$\sigma = ep\mu_h = 1,6 \times 10^{-19} \times 1,5 \times 10^{16} \times 1000 = 2,4 (\Omega\text{cm})^{-1}$$

$$\text{οπότε } \rho = \frac{1}{2,4} = 0,41 \Omega\text{cm}$$

9. Μετρήσεις σε ράβδο πυριτίου τύπου n με μήκος 10 mm, πλάτος 5 mm και πάχος 0,5 mm δίνουν αντίσταση 250 Ω κατά μήκος της ράβδου, και την ευκινησία των ηλεκτρονίων (από μετρήσεις με το φαινόμενο Hall) να είναι $0,14 \text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$. Να υπολογιστούν: α) Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων, β) Η αντίσταση της ράβδου κατά τη διεύθυνση του πλάτους της, γ) Η συγκέντρωση των προσμίξεων υποθέτοντας προσμίξεις αντιμονίου (πεντασθενές άτομο) με ποσοστό ιονισμού 100%, και δ) Η ένταση του ρεύματος αν εφαρμοστεί τάση 10 V.



Λύση

$$\alpha) R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{wt} \Rightarrow 250 = \rho \frac{10}{5.0,5} \Rightarrow \rho = 62,5 \Omega \text{mm} = 0,0625 \Omega \text{m}$$

$$\beta) \sigma = \frac{1}{\rho} = qn\mu \Rightarrow n = \frac{1}{\rho q\mu} = \frac{1}{0,0625 \cdot 1,6 \times 10^{-19} \cdot 0,14} = 7,14 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$$

$$\gamma) R = \rho \frac{w}{Lt} = 62,5 \frac{5}{10 \cdot 0,5} = 62,5 \Omega$$

Επειδή έχουμε πλήρη ιονισμό των ατόμων των προσμίξεων δότη, η συγκέντρωση των προσμίξεων είναι ίση με τη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων αφού κάθε ιονισμένο άτομο δότη απελευθερώνει ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας, συνεπώς:

$$N_D = n = 7,14 \times 10^{20} \text{m}^{-3}$$

$$\delta) J = qn\mu E = qn\mu \frac{V}{L} = 1,6 \times 10^{-19} \cdot 7,14 \times 10^{20} \text{m}^{-3} \cdot 0,14 \cdot \frac{10}{10} = 15,99 \text{Am}^{-1}$$

Να σημειωθεί ότι οι τιμές της ευκινησίας σε συνάρτηση με τη συγκέντρωση των προσμίξεων δίνονται σε διαγράμματα στη βιβλιογραφία.

Ασκήσεις για λύση

1. Ένα ορθογώνιο κομμάτι πλακιδίου πυριτίου με προσμίξεις αντιμονίου και πάχους 500 μm , έχει διαστάσεις 1 cm x 5 cm. Η αντίστασή του κατά τη διεύθυνση με το μεγαλύτερο μήκος είναι 1 k Ω . Η ευκινησία των ηλεκτρονίων και των οπών στο πυρίτιο είναι 0,14 $\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ και 0,045 $\text{m}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ αντίστοιχα. Να υπολογιστούν:

α) Η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων, β) Η συγκέντρωση των οπών, γ) Η συγκέντρωση των προσμίξεων αντιμονίου (100% ιονισμός), δ) Η συνεισφορά των ηλεκτρονίων και των οπών στο ρεύμα, αν εφαρμοστεί τάση 10 V κατά τη διεύθυνση με το μεγαλύτερο μήκος, ε) Το ποσοστό του συνολικού ρεύματος που οφείλεται στις οπές. Δίνεται ότι η συγκέντρωση φορέων του ενδογενούς Si είναι $n_i = 1,5 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-3}$.

2. Σε δείγμα πυριτίου ντοπαρισμένο με 10^{17} άτομα B/cm³ και με 9×10^{16} άτομα As/cm³, να υπολογιστεί η συγκέντρωση των φορέων πλειοψηφίας και μειοψηφίας στους 300 K καθώς και η θέση της στάθμης Fermi. Το E_g του πυριτίου είναι 1,2 eV και η ενδογενής συγκέντρωση φορέων είναι $n_i = 1,5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ ($k = 8,617 \times 10^{-5} \text{eV/K}$).

3. Πλακίδιο πυριτίου έχει μήκος 2 cm και διατομή 2 mm². Ο ημιαγωγός περιέχει προσμίξεις δότη As $N_D = 10^{17}$ άτομα/cm³ και προσμίξεις δέκτη, B $N_A = 9 \times 10^{16}$ άτομα/cm³. α) Να υπολογιστεί η αντίσταση του δείγματος στους 300 K. β) Να βρεθεί η αγωγιμότητα που οφείλεται σε ηλεκτρόνια και οπές. Η ευκινησία των ηλεκτρονίων είναι $\mu_e = 0,14 \text{m}^2 (\text{Vs})^{-1}$ και η ευκινησία των οπών είναι $\mu_h = 0,045 \text{m}^2 (\text{Vs})^{-1}$.

4. Δείγμα πυριτίου έχει προσμίξεις δότη με συγκέντρωση $N_D = 10^{14} \text{cm}^{-3}$. Να βρείτε τις συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και των οπών. Δίνεται $n_i = 10^{10} \text{cm}^{-3}$. Επίσης να υπολογίσετε την ειδική αντίσταση. Η ευκινησία των ηλεκτρονίων είναι $\mu_e = 0,14 \text{m}^2 (\text{Vs})^{-1}$ και η ευκινησία των οπών είναι $\mu_h = 0,045 \text{m}^2 (\text{Vs})^{-1}$.



5. I) Δείγμα αρσενικούχου γαλλίου GaAs περιέχει ιονισμένα άτομα δοτών με συγκέντρωση 10^{15}cm^{-3} . Να υπολογίσετε τις συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και των οπών. Επίσης να υπολογίσετε την ειδική αντίσταση. II) Δείγμα αρσενικούχου γαλλίου GaAs περιέχει ιονισμένα άτομα δοτών με συγκέντρωση 10^{15}cm^{-3} και ιονισμένα άτομα αποδεκτών με συγκέντρωση $2 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$. Να υπολογίσετε τις συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και των οπών και την ειδική αντίσταση. Δίνεται $n_i = 1,810^6 \text{cm}^{-3}$, $\mu_e = 8500 \text{cm}^2 (\text{V s})^{-1}$ και $\mu_h = 400 \text{cm}^2 (\text{Vs})^{-1}$.

Τιμές των N_c , N_v , n_i , E_g στους 300K για τους ημιαγωγούς Si, Ge, GaAs.

T= 300K	Si	Ge	GaAs
$N_c (\text{cm}^{-3})$	$2,80 \times 10^{19}$	$1,04 \times 10^{19}$	$4,7 \times 10^{17}$
$N_v (\text{cm}^{-3})$	$1,04 \times 10^{19}$	$6,0 \times 10^{18}$	$7,0 \times 10^{18}$
$n_i (\text{cm}^{-3})$	$1,02 \times 10^{10}$	$2,4 \times 10^{13}$	$1,8 \times 10^6$
$E_g (\text{eV})$	1,12	0,67	1,42