

## 1<sup>Η</sup> ΣΕΙΡΑ ΑΣΚΗΣΕΩΝ

1. Για την μεταλλοποίηση διασύνδεσης μεμονωμένων κυκλωματικών στοιχείων σε ολοκληρωμένα κυκλώματα συχνά χρησιμοποιούνται ορθογώνιες λωρίδες Al. Ποια είναι η αντίσταση λωρίδας Al με μήκος 100  $\mu\text{m}$ , πλάτος 5 $\mu\text{m}$  και πάχος 500nm. Η τιμή της ειδικής αγωγιμότητας του Al είναι ίση με  $3.5 \cdot 10^5 \text{ S/m}$ .

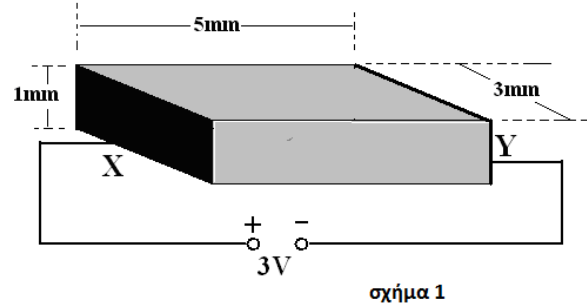
απάντηση: 114 $\Omega$

2. Μικρή πρισματική ράβδος (σχήμα 1), αποτελείται από υλικό ειδικής αντίστασης 3  $\Omega \cdot \text{cm}$ . Στα άκρα X και Y της ράβδου εφαρμόζεται τάση 3V.

Να προσδιοριστεί η πυκνότητα ρεύματος στη ράβδο σε μονάδα  $\text{A/cm}^2$  και στη συνέχεια η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος σε μονάδα mA. Με κατάλληλο πείραμα ανιχνεύτηκε ότι οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος στο υλικό της ράβδου είναι ηλεκτρόνια και μετρήθηκε η

ευκινησία τους και βρέθηκε ίση με  $833 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$ . Να

προσδιοριστεί ο μέσος χρόνος σε ms που απαιτείται ώστε ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο, να μεταβεί από το άκρο X της ράβδου στο άκρο Y.



απάντηση:  $J=2 \text{ A/cm}^2$ ,  $I=60\text{mA}$ ,  $t=0.1\text{ms}$

3. Διαφορά δυναμικού 1V εφαρμόζεται στα άκρα κυλινδρικής ράβδου ημιαγωγού μήκους  $\ell=200\mu\text{m}$  και διατομής  $A=200\mu\text{m}^2$  (σχήμα 2). Προγενέστερες μετρήσεις στο ανωτέρω δοκίμιο του ημιαγωγού στη θερμοκρασία 300K, έδωσαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Συγκέντρωση ελευθέρων ηλεκτρονίων  $n=6 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  και συγκέντρωση οπών  $p=1.5 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$

Οι ευκινήσεις ηλεκτρονίων και οπών του ημιαγωγού στη θερμοκρασία 300K, για ηλεκτρικά πεδία μικρότερα από  $10^4 \text{ V/m}$ ,

έχουν τιμές:  $920 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$  και  $340 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$  αντίστοιχα.

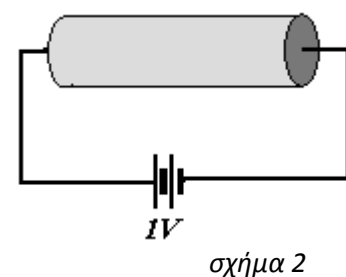
Τι τύπου είναι ο ημιαγωγός;

Να υπολογιστεί η ειδική αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Φορτίο ηλεκτρονίου:  $q=1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

Ποια η τιμή της πυκνότητας ρεύματος  $J$  στην κυλινδρική ράβδο του ημιαγωγού (σχήμα 2) και ποια η τιμή της έντασης  $I$  του ηλεκτρικού ρεύματος

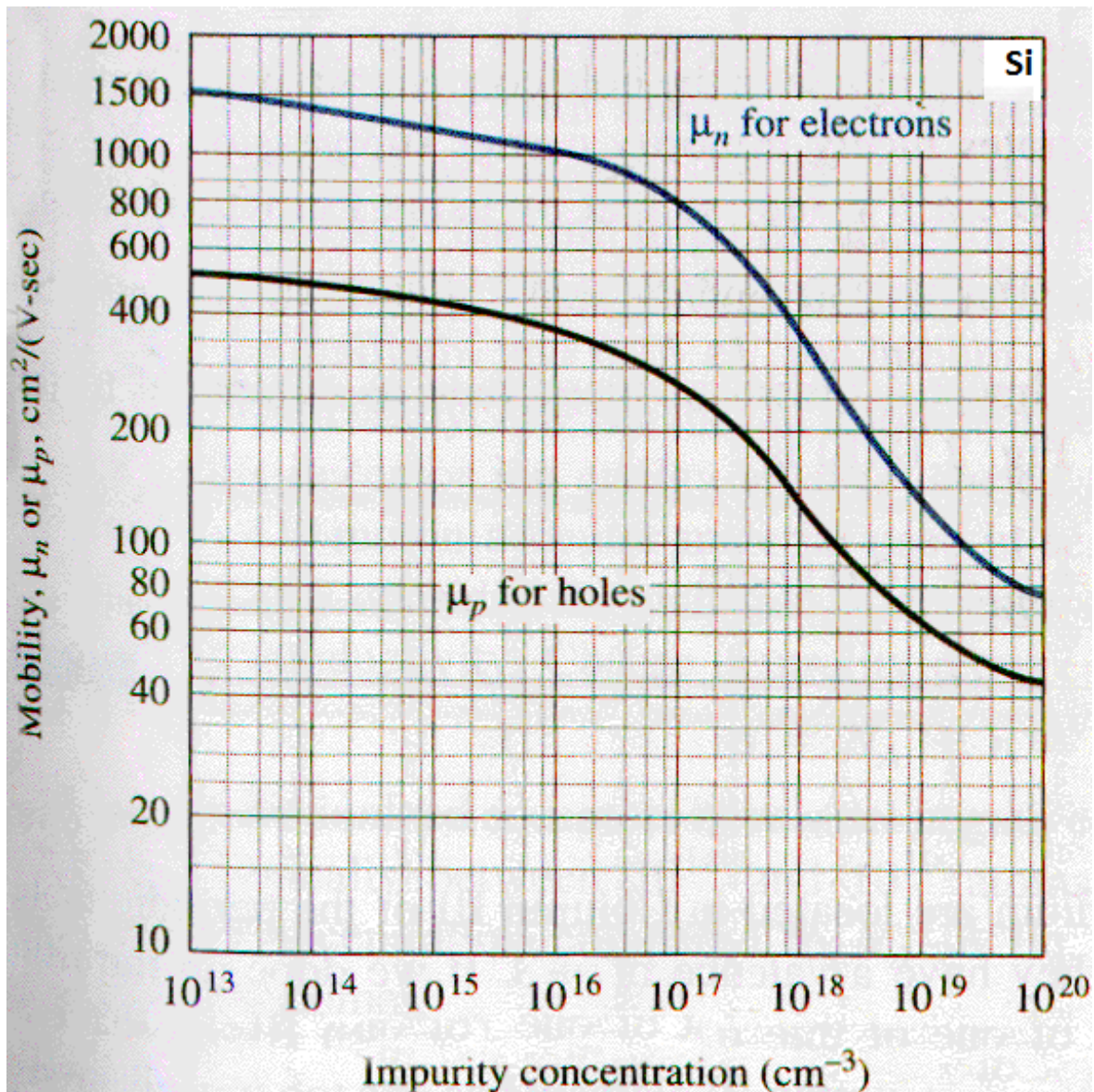
Αν ο ανωτέρω ημιαγωγός ήταν εντελώς καθαρός (χωρίς προσμίξεις) ποια τιμή θα είχε η ενδογενής συγκέντρωση φορέων  $n_i$  στη θερμοκρασία 300K.

απάντηση: n-τύπου, 0.88 S/m, 44  $\text{A/cm}^2$ , 88 $\mu\text{A}$ ,  $n_i=3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ .



4. Έχουν κατασκευαστεί δυο κρύσταλλοι Si. Ο 1<sup>ος</sup> είναι n-τύπου με συγκέντρωση προσμίξεων As  $10^{16} \text{cm}^{-3}$  και ο 2<sup>ος</sup> είναι p-τύπου με συγκέντρωση προσμίξεων B  $6 \cdot 10^{16} \text{cm}^{-3}$ . Να υπολογιστεί ο λόγος των ειδικών αγωγιμοτήτων  $\rho_n/\rho_p$  των ανωτέρω κρυστάλλων στη θερμοκρασία των 300K. Αξιοποίηση του διαγράμματος (σχήμα 3), των μεταβολών των ευκινησιών ηλεκτρονίων – οπών με τη συγκέντρωση των προσμίξεων για κρύσταλλο Si στη θερμοκρασία των 300K. Στη συνέχεια να υπολογιστεί η τιμή της πυκνότητας ρεύματος ολίσθησης (σε μονάδα  $\text{A}/\text{cm}^2$ ) στους ανωτέρω ημιαγωγούς, λόγω ύπαρξης ενός χαμηλού εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου έντασης  $\mathcal{E}=8000\text{V}/\text{m}$ . Στοιχειώδες φορτίο  $q=1.6 \cdot 10^{-19}\text{C}$ .

απάντηση:  $\rho_n/\rho_p=1.8$ ,  $J_n=100\text{A}/\text{cm}^2$ ,  $J_p=55.5\text{A}/\text{cm}^2$



σχήμα 3

5. Με δεδομένο ότι η ειδική αντίσταση ημιαγωγού με ενδογενή συμπεριφορά σε συνάρτηση με την θερμοκρασία T, περιγράφεται με καλή προσέγγιση από την ακόλουθη σχέση:

$$\rho(T) = \rho(T_0) \cdot \exp\left[\frac{E_g}{2k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right]$$

όπου  $T_0$  μια θερμοκρασία αναφοράς, να δειχθεί ότι θερμικός συντελεστής αντίστασης μπορεί να εκφραστεί ως ακολούθως:

$$\alpha = -\frac{E_g}{2k} \cdot \frac{1}{T^2}$$

6. Με δεδομένο ότι η αντίσταση λεπτού μεταλλικού σύρματος μήκους 1m και διατομής 0.01mm<sup>2</sup>, σε συνάρτηση με την θερμοκρασία T, περιγράφεται με καλή προσέγγιση από την ακόλουθη σχέση:

$$R(T) = R(T_0) \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right)^{1.2}$$

όπου  $T_0$  μια θερμοκρασία αναφοράς, να υπολογιστεί η θερμοκρασία T την οποία θα αποκτήσει το σύρμα όταν διαρρέεται από ρεύμα 2.5A υπό τάση 100V. Η αντίσταση του σύρματος στη θερμοκρασία δωματίου (20°C) μετρήθηκε ίση με 11Ω.

απάντηση: T=566K

7. Μια θερμαντική αντίσταση από σύρμα χρωμιοκελίνης όταν τροφοδοτείται με τάση 80V, αναπτύσσει θερμοκρασία 1100K και καταναλώνει ισχύ 0.5kW. Η ίδια θερμαντική αντίσταση όταν βρεθεί εντός ψυκτικού θαλάμου, και τροφοδοτούμενη πάλι από 80V, αναπτύσσει θερμοκρασία 500K. Πόση είναι η ισχύς που καταναλώνει στην περίπτωση αυτή η αντίσταση. Η μεταβολή της αντίστασης σύρματος χρωμιοκελίνης με τη θερμοκρασία ακολουθεί γραμμικό νομό:  $R(T_2) = R(T_1) \cdot \{1 + \alpha \cdot (T_2 - T_1)\}$ . Ο θερμικός συντελεστής αντίστασης του κράματος χρωμιοκελίνης είναι  $\alpha = 4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .

απάντηση: 0.62kW

8. Σε ποια θερμοκρασία η πιθανότητα κατάληψης ενεργειακής κατάστασης E κατά 0.1eV πάνω από την στάθμη Fermi ενός μετάλλου, είναι ίση με 1%. Σταθερά Boltzmann  $k = 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$ . Σε ποια θερμοκρασία η πιθανότητα γίνεται 5%.

απάντηση: 252K, 395K

9. Δείγμα n-Si, είναι εμπλουτισμένο με δότες (άτομα As), συγκέντρωσης  $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . Μετρήθηκε η ειδική αντίσταση στους 300K και στους 400K και βρέθηκαν τιμές 0.078 Ω·cm και 0.149 Ω·cm αντίστοιχα. Να υπολογιστούν οι τιμές ευκινησίας των ηλεκτρονίων στους 300K και στους 400K. Ενδογενής συγκέντρωση φορέων Si στους 300K και 400K:  $1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  και  $4 \cdot 5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ .

$$\text{απάντηση: } 800 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}, 420 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}$$

10. Δείγμα n-Si, είναι εμπλουτισμένο με δότες (άτομα P), συγκέντρωσης  $N_D = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ . Το δείγμα νοθεύεται και με αποδέκτες (άτομα B), συγκέντρωσης  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ . Να υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις των φορέων (ηλεκτρονίων και οπών) στη θερμοκρασία 300K αν η ενδογενής συγκέντρωση φορέων  $n_i = 1.45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ .

$$\text{απάντηση: } p = 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}, n = 4.2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

**11.** Δείγμα n-Si, είναι εμπλουτισμένο με δότες (άτομα P), συγκέντρωσης  $N_D=10^{13}\text{cm}^{-3}$ . Ποια η τιμή της ειδικής αντίστασης στους 300K. Το δείγμα νοθεύεται και με αποδέκτες (άτομα B), συγκέντρωσης  $N_A=6\cdot 10^{13}\text{cm}^{-3}$ . Υπολογισμός της νέας τιμής της ειδικής αντίστασης στους 300K. Για τους υπολογισμούς να γίνει χρήση του διαγράμματος του σχήματος 3. Ενδογενής συγκέντρωση φορέων Si στους 300K:  $n_i=1.45\cdot 10^{10}\text{cm}^{-3}$ .

απάντηση: 417 Ω·cm, 284 Ω·cm.

**12.** Με δεδομένο ότι η θέση της στάθμης Fermi ( $E_F$ ) ημιαγωγού προσμίξεων σε σχέση με τη θέση της στάθμης Fermi ( $E_{Fi}$ ) ενδογενούς ημιαγωγού, δίνεται από τον τύπο:

$$E_F = E_{Fi} + \frac{1}{2}kT \cdot \ln\left(\frac{n}{p}\right)$$

να υπολογιστεί πόσα eV απέχει η  $E_F$  από την στάθμη  $E_C$  στους 300K κρυστάλλου n-Si με συγκέντρωση δοτών (ατόμων Sb)  $N_D=10^{16}\text{cm}^{-3}$ . Ενεργειακό χάσμα Si 1.12eV. Η ποσότητα kT στους 300K έχει τιμή 26meV.

Ο ανωτέρω κρύσταλλος νοθεύεται με προσθήκη αποδεκτών (ατόμων B) συγκέντρωσης  $N_A=2\cdot 10^{17}\text{cm}^{-3}$ . Πόσα eV θα μετατοπιστεί η στάθμη Fermi. Ενδογενής συγκέντρωση φορέων Si στους 300K  $n_i=1.45\cdot 10^{10}\text{cm}^{-3}$ .

απάντηση: 0.21eV κάτω από την  $E_C$ , 0.78eV προς τη ζώνη σθένους.

**13.** Ποια είναι η πιθανότητα μια ενεργειακή στάθμη στην ζώνη αγωγιμότητας Si που απέχει από την στάθμη  $E_C$  κατά 0.01 eV, να είναι κατειλημμένη στη θερμοκρασία των 300K, α) για ενδογενές Si και β) για n-Si με συγκέντρωση δοτών (ατόμων As)  $N_D=10^{16}\text{cm}^{-3}$ . Η ποσότητα kT στους 300K έχει τιμή 0.026 eV. Ενδογενής συγκέντρωση φορέων Si στους 300K  $n_i=1.45\cdot 10^{10}\text{cm}^{-3}$ . Ενεργειακό χάσμα Si 1.12eV.

απάντηση: α)  $3\cdot 10^{-10}$  β)  $2\cdot 10^{-4}$

**14.** Στα άκρα δείγματος n-Si μήκους 10mm εφαρμόζεται τάση 5V. Μετρήσεις της ευκινησίας των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας έδωσαν τιμή  $\mu_n = 800\frac{\text{cm}^2}{\text{V}\cdot\text{s}}$ . Αφού χρησιμοποιηθεί το διάγραμμα του σχήματος 3, να υπολογιστεί η πυκνότητα του ρεύματος ολίσθησης στο ανωτέρω δείγμα. Στοιχειώδες φορτίο  $q=1.6\cdot 10^{-19}\text{C}$ .

απάντηση: 64 A/cm<sup>2</sup>

**15.** Κρύσταλλος n-Si είναι εμπλουτισμένος με  $10^{15}$  άτομα P ανά  $\text{cm}^3$ . Η στάθμη των δοτών  $E_D$  βρίσκεται κατά 0.045eV κάτω από τη ενέργεια  $E_C$  (βάση της ζώνης αγωγιμότητας). Πόση είναι η ενεργειακή απόσταση μεταξύ των σταθμών  $E_F$  και  $E_D$  στους 300K. Στους 300K,  $kT = 0.026\text{eV}$ ,  $n_i=1.45\cdot 10^{10}\text{cm}^{-3}$  και το ενεργειακό χάσμα του Si είναι 1.12eV.

απάντηση: 0.225eV