



ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ ΘΕΜΑΤΩΝ

1) Δείγμα n-Si ($N_D=10^{16}\text{cm}^{-3}$), νοθεύεται με προσμίξεις αποδεκτών ($N_A=10^{14}\text{cm}^{-3}$). Ποια σχέση συνδέει τις συγκεντρώσεις (n) και (p) ηλεκτρονίων και οπών με τις συγκεντρώσεις (N_D) και (N_A) των προσμίξεων. Εξηγήστε.

$$n + N_A = p + N_D$$

Το πρώτο μέλος της ισότητας εκφράζει την συνολική συγκέντρωση του αρνητικού φορτίου στον κρύσταλλο του n-Si (ελεύθεροι αρνητικοί φορείς: ηλεκτρόνια) και τους αρνητικά ιονισμένους πεντασθενείς δότες. Το δεύτερο μέλος εκφράζει την συνολική συγκέντρωση του θετικού φορτίου στον κρύσταλλο του n-Si (θετικοί φορείς: οπές) και τους θετικά ιονισμένους τρισθενείς αποδέκτες. Η ισότητα σχετίζεται με την αρχή της ηλεκτρικής ουδετερότητας του κρυστάλλου.

2) Σε δείγμα n-Si ($N_D=10^{16}\text{cm}^{-3}$), προσδιορίστε στους 300K την συγκέντρωση των οπών. Η ενδογενής συγκέντρωση φορέων (n_i) στους 300K του Si, είναι 10^{10}cm^{-3} .

$$N_D \gg n_i \text{ συνεπώς } n \approx N_D. \text{ Με δεδομένο ότι } n \cdot p = n_i^2 \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{10^{20}}{10^{16}} \text{cm}^{-3} = 10^4 \text{cm}^{-3}$$

3) Σε δισκίο Si υψηλής καθαρότητας μετρήθηκε στους 300K, η συγκέντρωση (n) των ελεύθερων ηλεκτρονίων και βρέθηκε τιμή $2 \cdot 10^{10}\text{cm}^{-3}$. Η ενδογενής συγκέντρωση φορέων (n_i) στους 300K του Si, είναι 10^{10}cm^{-3} .

α) Ποιοι είναι οι φορείς πλειονότητας και γιατί;

Επειδή $n > n_i$, μέσω της σχέσης $n \cdot p = n_i^2$ προκύπτει $p < n_i$, άρα $n > p$ (φορείς πλειονότητας ηλεκτρόνια).

β) Ποια η τιμή του λόγου (n/p) στους 300K

$$\text{Επειδή } p = \frac{n_i^2}{n}, \text{ τότε: } \frac{n}{p} = \frac{n}{n_i^2/n} = \frac{n^2}{n_i^2} = \frac{4 \cdot 10^{20}}{10^{20}} = 4.$$

γ) Ποια η τιμή της ειδικής αντίστασης του ανωτέρω δισκίου στους 300K. Φορτίο ηλεκτρονίου $1.6 \cdot 10^{-19}\text{C}$. Τιμές ευκινησιών ηλεκτρονίων και οπών $1600\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ και $520\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ αντίστοιχα.

Η αγωγιμότητα σ θα περιγράφεται από τη σχέση: $\sigma = q \cdot \mu_n \cdot n + q \cdot \mu_p \cdot p$, λόγω του γεγονότος ότι μεταξύ n και p δεν υφίσταται ισχυρή ανισότητα ($n=4p$). Άρα:

$$\begin{aligned} \sigma &= q \cdot \left(\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot \frac{n}{4} \right) = q \cdot n \cdot \left(\mu_n + \frac{\mu_p}{4} \right) = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{C} \cdot 2 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-3} \left(1600 + \frac{520}{4} \right) \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \\ &= 5.54 \cdot 10^{-6} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1} \end{aligned}$$

$$\text{Συνεπώς η τιμή της ειδικής αντίστασης } \rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{5.54 \cdot 10^{-6} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}} = 1.8 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$$

4) Σε μια p-n επαφή Si η συγκέντρωση δοτών της n-περιοχής είναι 10^{16}cm^{-3} και της συγκέντρωσης αποδεκτών της p-περιοχής είναι $3 \cdot 10^{15}\text{cm}^{-3}$. Αν το εύρος της περιοχής

απογύμνωσης στην n-περιοχή $l_n = 3\mu\text{m}$, να προσδιοριστεί το εύρος l_p της περιοχής απογύμνωσης στην p-περιοχή.

Με δεδομένο ότι $N_D \cdot l_n = N_A \cdot l_p \Rightarrow l_p = \frac{N_D}{N_A} \cdot l_n = \frac{10^{16}}{3 \cdot 10^{15}} \cdot 3\mu\text{m} = 10\mu\text{m}$

5) Πηγή σταθερού ρεύματος εξασφαλίζει σταθερό ρεύμα ορθής φοράς, μιας διόδου Si. Αν προκληθεί αύξηση της θερμοκρασίας, τι είδους μεταβολή θα υποστεί η τάση της διόδου. Εξηγείστε.

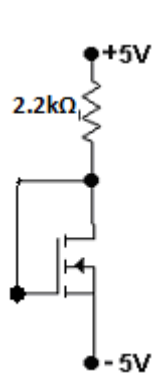
Προκειμένου το ρεύμα μιας διόδου να διατηρεί μια σταθερή τιμή σε μια μεταβολή κατά ΔT της θερμοκρασίας, η αντίστοιχη μεταβολή ΔV της τάσης στα άκρα της διόδου υπολογίζεται από την σχέση : $\Delta V = b \cdot \Delta T$, όπου b ένας θερμοκρασιακός συντελεστής με τιμή $b = -2.5 \text{mV}/\text{K}$ περίπου. Συνεπώς προκύπτει μείωση της τιμής της τάσης της διόδου λόγω των αρνητικών τιμών του συντελεστή b.

6) Η εξίσωση ρεύματος – τάσης διόδου Si, στην περιοχή τάσεων ορθής πόλωσης από 0.25V έως 0.55V περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση: $I = I_0 \exp(V/nV_T)$, όπου I_0 ένα σταθερό ρεύμα, n συντελεστής με τιμή ίση με 1.75 και $V_T = kT/q$ με τιμή 0.026V στους 300K. Μετρείται το ρεύμα της διόδου και η τιμή βρίσκεται ίση με $5 \cdot 10^4 \cdot I_0$. Ποια η τιμή V της τάσης πόλωσης. [0.49V]

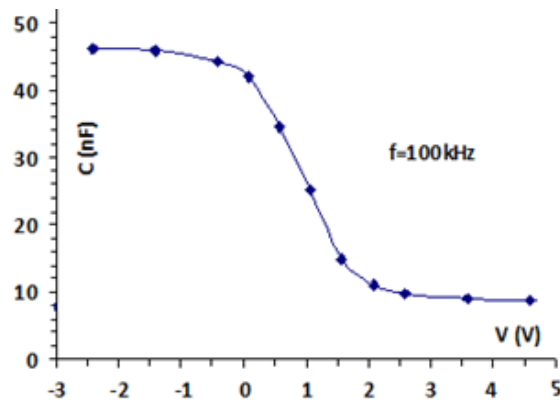
$I = I_0 \exp(V/nV_T) \Rightarrow 5 \cdot 10^4 I_0 = I_0 \exp(V/nV_T) \Rightarrow V/nV_T = \ln(5 \cdot 10^4) = 10.82 \Rightarrow$
 $V = 10.82 \cdot n \cdot V_T = 10.82 \cdot 1.75 \cdot 0.026\text{V} = 0.49\text{V}$

7) Η εξάρτηση του ανάστροφου ρεύματος διόδου Si περιγράφεται από τον ακόλουθο νόμο: $I_R(\theta) = I_R(\theta_0) \cdot 2^{\frac{\theta - \theta_0}{10}}$, όπου $I_R(\theta)$ και $I_R(\theta_0)$ τα ρεύματα στις θερμοκρασίες θ και θ_0 αντίστοιχα. Στη θερμοκρασία $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ το ρεύμα έχει τιμή 100nA. Ποια τιμή θα αποκτήσει το ρεύμα αν η θερμοκρασία της διόδου ανέλθει στους 30°C .

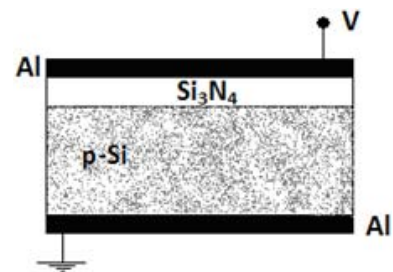
$I_R(30^\circ\text{C}) = 100\text{nA} \cdot 2^{\frac{30-25}{10}} = 100\text{nA} \cdot 2^{0.5} = 141\text{nA}$



Σχήμα 1



Σχήμα 2



Σχήμα 3

8) Να δικαιολογηθεί ότι το NMOS στο κύκλωμα του σχήματος 1 λειτουργεί πάντα στην περιοχή πέραν της φραγής.

Για λειτουργία στην περιοχή πέραν της φραγής πρέπει: $V_{DS} > V_{DS}(\text{tran})$ (1).

Η τάση $V_{DS}(\text{tran}) = V_{GS} - V_T$. Επειδή $V_D = V_G$, έχουμε: $V_{DS} = V_{GS}$ άρα $V_{DS}(\text{tran}) = V_{DS} - V_T$.

Συνεπώς ικανοποιείται η σχέση (1).

9) Στο κύκλωμα του σχήματος 1, το ρεύμα εκροής έχει τιμή 2mA.

α) Να προσδιοριστεί το δυναμικό (V_D) της εκροής.

$$+5V - V_D = I_D \cdot R_D = 2\text{mA} \cdot 2.2\text{k}\Omega = 4.4V. \text{ Άρα } V_D = +5V - 4.4V = +0.6V$$

β) Να προσδιοριστεί η παράμετρος k του MOS λαμβάνοντας υπόψη την ακόλουθη σχέση μεταξύ ρεύματος εκροής I_D και τάσης V_{GS} : $I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$ Η τάση κατωφλίου του MOS $V_T = 2V$.

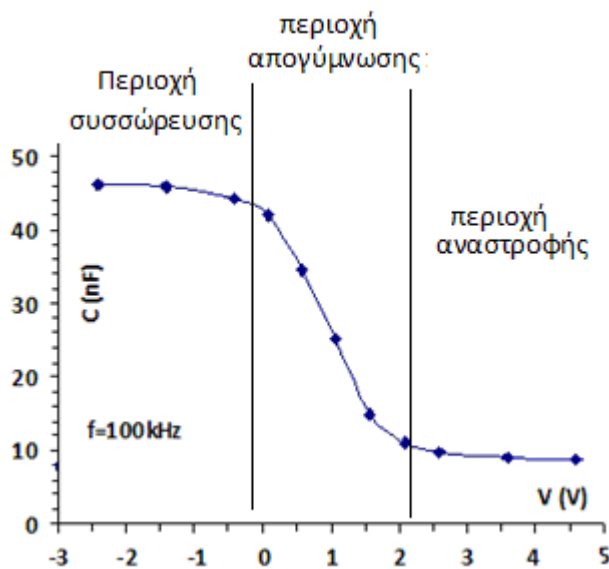
Επειδή $V_D = V_G$, έχουμε: $V_{GS} = V_{DS}$ και η έκφραση του ρεύματος εκροής λαμβάνει τη μορφή:

$$I_D = k(V_{DS} - V_T)^2 = k \cdot (V_D - V_S - V_T)^2 = k \cdot (0.4V - (-5V) - 2V)^2 = k \cdot (0.4V - (-5V) - 2V)^2 = k \cdot 3.4^2 V^2 = k \cdot 11.56V^2$$

$$\text{Άρα: } k = \frac{I_D}{11.56V^2} = \frac{2\text{mA}}{11.56V^2} = 0.17 \frac{\text{mA}}{V^2}$$

10) Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται η C-V χαρακτηριστική της MIS (Metal: Al, Insulator: Si_3N_4 , semiconductor: p-Si) διάταξης (σχήμα 3).

α) Στο διάγραμμα της C-V χαρακτηριστικής (σχήμα 2), σημειώστε τις περιοχές συσσώρευσης, απογύμνωσης και αναστροφής, ανάλογα με την τιμή της τάσης V .



β) Προκειμένου να δημιουργήσουμε κάτω από το μονωτικό στρώμα του Si_3N_4 , στρώμα αναστροφής (περιοχή n-Si), να εκτιμηθεί μια ικανοποιητική τιμή του δυναμικού V .

$$V > V_T \approx 2.1V.$$

Άρα μια ικανοποιητική τιμή του δυναμικού V μπορεί να είναι τα +3V.