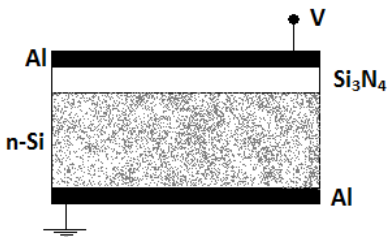


ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ

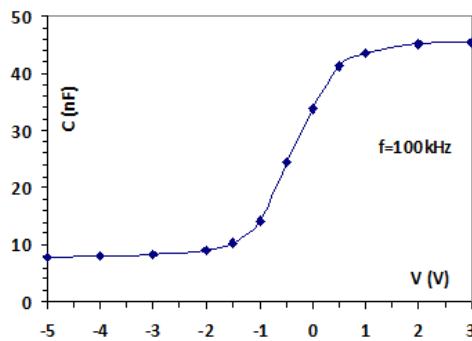
ΘΕΜΑ 1^ο (2+2=4 ΜΟΝΑΔΕΣ)

Α) Θεωρούμε μια διάταξη MIS (Metal: Al, Insulator: Si₃N₄, semiconductor: n-Si) (σχήμα 1). προκειμένου να δημιουργήσουμε κάτω από το μονωτικό στρώμα του Si₃N₄, στρώμα αναστροφής (περιοχή p-Si), να εκτιμηθεί μια ικανοποιητική τιμή του δυναμικού V, που θα προκαλέσει την ανωτέρω απαίτηση. Για την υποβοήθηση της απάντησης προσφέρεται η C-V χαρακτηριστική της MIS διάταξης (σχήμα 2). Αιτιολόγηση της απάντησης.

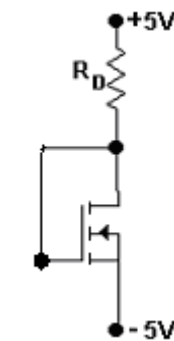
Β) Θεωρούμε το NMOS στο κύκλωμα του σχήματος 3 με χαρακτηριστικές παραμέτρους $k=10^{-4} \text{A/V}^2$, $V_T=2\text{V}$. Να δικαιολογηθεί ότι το NMOS με αυτό τον τρόπο σύνδεσης λειτουργεί πάντα στην περιοχή πέραν της φραγής. Με δεδομένο ότι στην ανωτέρω περιοχή μεταξύ ρεύματος εκροής I_D και τάσης V_{GS} υφίσταται η σχέση: $I_D = k(V_{GS} - V_T)^2$, να προσδιοριστεί η αντίσταση R_D, προκειμένου το NMOS, να διαρρέεται από ρεύμα 1.6mA.



Σχήμα 1



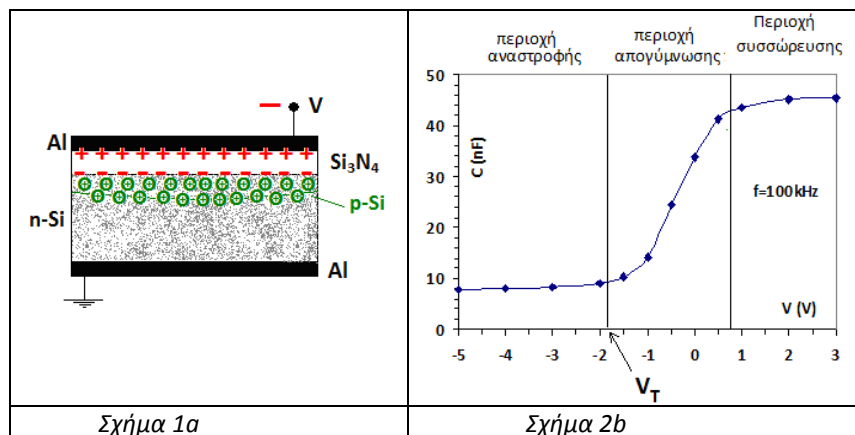
Σχήμα 2



Σχήμα 3

ΑΠΑΝΤΗΣΗ

Α) Προκειμένου κάτω από το μονωτικό στρώμα του Si₃N₄ να δημιουργηθεί περιοχή p-τύπου, απαιτείται να εφαρμοστεί αρνητικό δυναμικό στο στρώμα του Al, έτσι ώστε μέσω του προσανατολισμού των διπόλων του Si₃N₄ να εμφανιστεί αρνητικό φορτίο στη συνοριακή επιφάνεια Si₃N₄/n-Si. Συνεπώς κάτω από το στρώμα του Si₃N₄ θα συσσωρευτούν οι οπές (θετικοί φορείς-φορείς μειονότητας στο n-Si), με αποτέλεσμα σ' αυτή την περιοχή οι οπές να γίνουν φορείς πλειονότητας και η περιοχή να καταστεί p-τύπου (βλέπε σχήμα 1a). Για να συμβεί αυτή η διαδικασία το αρνητικό δυναμικό V πρέπει να



Σχήμα 1a

Σχήμα 2b

λάβει μια τιμή που να υπερβαίνει την τάση κατωφλίου V_T της διάταξης. Κατά προσέγγιση η εκτίμηση της V_T μπορεί να γίνει από το διάγραμμα της C-V χαρακτηριστικής (βλέπε σχήμα 1b). Συνεπώς ένα δυναμικό $V = -3V$ είναι ικανό να δημιουργήσει το στρώμα αναστροφής.

Β) 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).

Με βάση το κύκλωμα (σχήμα 3) έχουμε: $+5V - (-5V) = I_D \cdot R_D + V_{DS}$ ή $10V = I_D \cdot R_D + V_{GS}$ ή $V_{GS} = 10V - I_D \cdot R_D$, οπότε για το ρεύμα εκροής έχουμε την ακόλουθη έκφραση:

$$I_D = k(10V - I_D \cdot R_D - V_T)^2 = k(8V - I_D \cdot R_D)^2 \quad \text{ή} \quad \pm \sqrt{\frac{I_D}{k}} = 8V - I_D \cdot R_D \quad \text{ή} \quad \pm \sqrt{\frac{1.6 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{10^{-4} \frac{\text{A}}{\text{V}^2}}} = 8V - I_D \cdot R_D \quad \text{ή}$$

$\pm 4V = 8V - I_D \cdot R_D$, οπότε $I_D \cdot R_D = 8V \pm 4V$. Δεδομένου ότι η λύση $I_D \cdot R_D = 12V$ απορρίπτεται ως μεγαλύτερη της τάση των 10V, τελικά προκύπτει: $I_D \cdot R_D = 4V$, οπότε:

$$R_D = \frac{4V}{1.6 \text{ mA}} = 2.5 \text{ k}\Omega$$

ΘΕΜΑ 2^ο (1.5+1=2.5 ΜΟΝΑΔΕΣ)

Α) Να σχεδιαστεί η μορφή του ενεργειακού διαγράμματος μιας ανοικτής επαφής p-n (χωρίς πόλωση) ημιαγωγού Si με δεδομένο ότι το δυναμικό επαφής έχει τιμή 0.55V. Στην περίπτωση που εφαρμόζεται τάση ορθής πόλωσης +0.35V, επανασχεδιάστε το ενεργειακό διάγραμμα σε αντιστοιχία με το προηγούμενο.

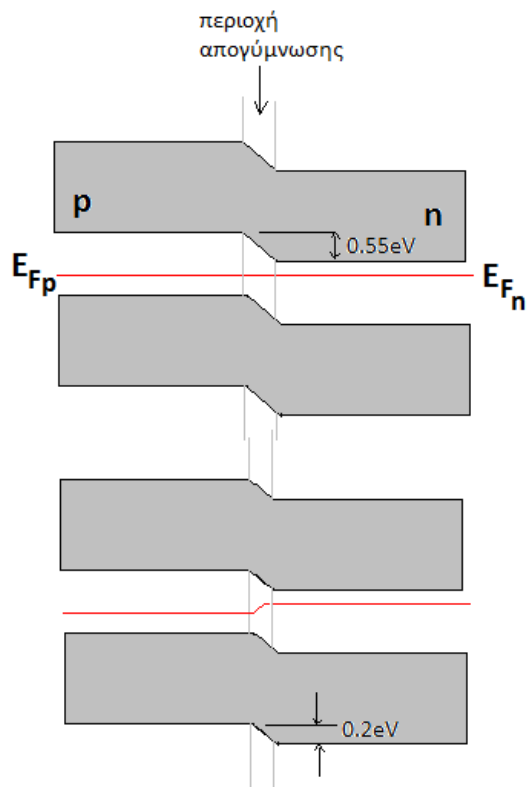
Β) Δίοδος Si είναι πολωμένη στην περιοχή τάσεων ορθής πόλωσης από 0.25V έως 0.55V για την οποία η εξίσωση ρεύματος - τάσης περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση: $I = I_0 \exp(V/nV_T)$, όπου I_0 ένα σταθερό ρεύμα, n συντελεστής με τιμή ίση με 1.8 και $V_T = kT/q$ με τιμή 0.026V στους 300K. Μετρείται το ρεύμα της διόδου και η τιμή βρίσκεται ίση με $10^4 \cdot I_0$. Ποια η τιμή V της τάσης πόλωσης.

ΑΠΑΝΤΗΣΗ

Α) Βλέπε διπλανό σχήμα.

$$\text{Β)} I = I_0 \exp(V/nV_T) \Rightarrow \frac{V}{nV_T} = \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \ln 10^4 = 9.21$$

Άρα η επικρατούσα τάση στα άκρα της διόδου είναι:
 $V = 9.21 \cdot n \cdot V_T = 9.21 \cdot 1.8 \cdot 0.026V = 0.43V$



ΘΕΜΑ 3^ο (1.5+1.5=3 ΜΟΝΑΔΕΣ)

A) Σε δισκίο Si υψηλής καθαρότητας μετρήθηκε στους 300K, η συγκέντρωση (n) των ελεύθερων ηλεκτρονίων και βρέθηκε τιμή $1.8 \cdot 10^{10} \text{cm}^{-3}$. Η ενδογενής συγκέντρωση φορέων (n_i) στους 300K του Si, είναι 10^{10}cm^{-3} . α) Ποιοι είναι οι φορείς πλειονότητας και γιατί; β) ποια η τιμή του λόγου (n/p) στους 300K; γ) Αν η θερμοκρασία ανέλθει στους 400K τι είδους μεταβολή θα επέλθει στην τιμή του λόγου n/p και γιατί; δ) Υπολογίστε την τιμή της ειδικής αντίστασης του ανωτέρω δισκίου στους 300K, λαμβάνοντας υπόψη 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. Φορτίο ηλεκτρονίου $1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$.

B) Το ανωτέρω δισκίο Si, νοθεύεται με προσμίξεις ατόμων As (5σθενή άτομα) σε συγκέντρωση 10^{16}cm^{-3} . Να προσδιοριστεί η νέα τιμή του λόγου (n/p), καθώς και η τιμή της ειδικής αντίστασης στους 300K. Αξιοποίηση του διπλανού διαγράμματος.

ΑΠΑΝΤΗΣΗ

A)

α) Επειδή $n > n_i$, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια θα είναι φορείς πλειονότητας.

β) Επειδή $n \cdot p = n_i^2 \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{n}$.

$$\text{Άρα ο λόγος } \frac{n}{p} = \left(\frac{n}{n_i} \right)^2 = \left(\frac{1.8 \cdot 10^{10}}{10^{10}} \right)^2 = 1.8^2 = 3.24$$

γ) Αν η θερμοκρασία ανέλθει στους 400K, τότε λόγω αύξησης του ρυθμού των θερμικών διασπάσεων των ομοιοπολικών δεσμών του Si, θα παραχθεί μεγάλος αριθμός ζευγών ηλεκτρονίων – οπών. Αποτέλεσμα ο λόγος (n/p) να ελαττωθεί.

δ) Για την τιμή της ειδικής αγωγιμότητας σ έχουμε:

$$\sigma = q \cdot (\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p) = q \cdot \left(\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot \frac{n}{3.24} \right) = q \cdot n \cdot \left(\mu_n + \frac{\mu_p}{3.24} \right).$$

Με αριθμητική αντικατάσταση των τιμών προκύπτει: $\sigma = 5 \cdot 10^{-6} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$,

οπότε για τιμή της ειδικής αντίστασης ρ έχουμε:

$$\rho = 1/\sigma = 2 \cdot 10^5 \Omega \cdot \text{cm}.$$

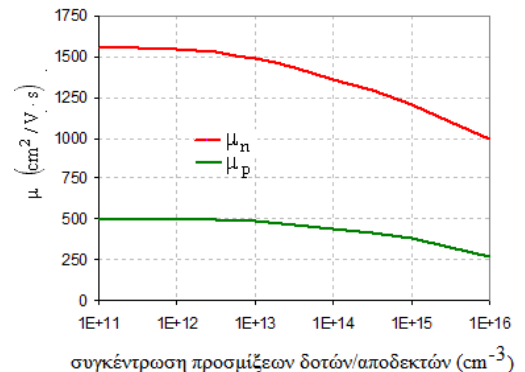
B) Επειδή $N_D = 10^{16} \text{cm}^{-3} \gg n_i$, θα ισχύει: $n \approx N_D = 10^{16} \text{cm}^{-3}$ και $p \ll n$ με τιμή: $p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{10^{20}}{10^{16}} = 10^4 \text{cm}^{-3}$.

Άρα ο λόγος n/p θα λάβει τιμή: $\frac{n}{p} = \frac{10^{16}}{10^4} = 10^{12}$

Για την νέα τιμή της ειδικής αγωγιμότητας σ θα έχουμε: $\sigma = q \cdot \mu_n \cdot N_D$, με τιμή $\mu_n = 1000 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ με βάση το διάγραμμα του σχήματος, οπότε: $\sigma = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 1000 \cdot 10^{16} \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} = 1.6 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$,

οπότε για τιμή της ειδικής αντίστασης ρ έχουμε:

$$\rho = 1/\sigma = 0.625 \Omega \cdot \text{cm}.$$



ΘΕΜΑ 4^ο ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ (4 ΜΟΝΑΔΕΣ)

1) Ποιο από τα ακόλουθα υλικά δεν είναι ημιαγωγός αλλά μονωτής.
 Ge Si GaAs InAs Cu₂O SiO₂

2) Ο θερμικός συντελεστής αντίστασης ενός υλικού έχει τιμή: -0.048 ανά °C. Το υλικό έχει συμπεριφορά: μετάλλου ημιαγωγού

3) Ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας σε ημιαγωγό έχει κινητική ενέργεια 0.02 eV. Η ενεργειακή στάθμη E που καταλαμβάνει θα βρίσκεται 0.02 eV:

πάνω από την στάθμη Fermi. κάτω από την στάθμη E_c. πάνω από την στάθμη E_c

4) Το υλικό (κράμα) Al_xIn_{1-x}As έχει συμπεριφορά: μετάλλου ημιαγωγού μονωτή

5) Η ενδογενής συγκέντρωση φορέων στους 300K του Ge έχει τιμή n_i=2.4·10¹³cm⁻³. Η πιο πιθανή τιμή της συγκέντρωσης (n) σε μονάδα cm⁻³, των ελευθέρων ηλεκτρονίων, δείγματος p-Ge είναι της τάξης του: 10⁸ 10¹³ 10²² 10¹⁵

6) Δείγμα n-Si (N_D=10¹⁴cm⁻³), νοθεύεται με προσμίξεις αποδεκτών (N_A=10¹⁵cm⁻³). Ποια σχέση είναι σωστή: n>p, n<p, n=p, n≈p

7) Δείγμα n-Si (N_D=10¹⁴cm⁻³), νοθεύεται με προσμίξεις αποδεκτών (N_A=10¹⁶cm⁻³). Η στάθμη Fermi:

θα μετακινηθεί και θα πλησιάσει προς τη ζώνη σθένους, θα μετακινηθεί προς το μέσο του ενεργειακού χάσματος, θα παραμείνει αμετάβλητη και πλησίον της ζώνης αγωγιμότητας

8) Δείγμα n-Si (N_D=10¹⁶cm⁻³), νοθεύεται με προσμίξεις αποδεκτών (N_A=10¹⁵cm⁻³). Στους 300K ποια σχέση είναι σωστή: n·p = 10³¹cm⁻³ n - p = 9·10¹⁵cm⁻³ n + p = 1.1·10¹⁶cm⁻³ n·p = 10¹⁶cm⁻³

9) Η πυκνότητα του ρεύματος διάχυσης των οπών σ' ένα ημιαγωγό περιγράφεται από την ακόλουθη

σχέση: $J_p(x,t) = q \cdot D_p \cdot \frac{dp}{dx}$. Η σχέση είναι: σωστή λάθος

10) Σε μια p-n επαφή Si η συγκέντρωση δοτών της n-περιοχής είναι 10¹⁶cm⁻³ και της συγκέντρωσης αποδεκτών της p-περιοχής είναι 10¹³cm⁻³. Αν l_n είναι το εύρος της περιοχής απογύμνωσης στην n-περιοχή, τότε το εύρος l_p της περιοχής απογύμνωσης στην p-περιοχή, θα είναι:

$l_p \approx l_n$ $l_p \gg l_n$ $l_p \ll l_n$

11) Διατηρώντας σταθερό το ρεύμα ορθής φοράς, μιας διόδου Si, αυξάνουμε την θερμοκρασία της. Η τάση στα άκρα της θα: αυξηθεί μειωθεί παραμείνει σταθερή

12) Η εξάρτηση του ανάστροφου ρεύματος διόδου Si από τη περιγράφεται από τον ακόλουθο νόμο:

$I_R(\theta) = I_R(\theta_0) \cdot 2^{\frac{\theta-\theta_0}{10}}$, όπου I_R(θ) και I_R(θ₀) τα ρεύματα στις θερμοκρασίες θ και θ₀ αντίστοιχα. Στη θερμοκρασία θ₀=25°C το ρεύμα έχει τιμή 100nA. Στους 15°C θα αποκτήσει τιμή:

200nA, 20nA, 10nA, 50nA

13) Η εξάρτηση του ανάστροφου ρεύματος διόδου Si από τη περιγράφεται από τον ακόλουθο νόμο:

$I_R(\theta) = I_R(\theta_0) \cdot 2^{\frac{\theta-\theta_0}{10}}$, όπου I_R(θ) και I_R(θ₀) τα ρεύματα στις θερμοκρασίες θ και θ₀ αντίστοιχα. Στη θερμοκρασία θ₀=25°C το ρεύμα έχει τιμή 100nA. Στους 30°C θα αποκτήσει τιμή:

200nA, 150nA, 75nA, 141nA

14) Ο θερμοκρασιακός συντελεστής b της διόδου Si, έχει τιμή -2.5 mV/K και στα άκρα της επικρατεί τάση 0.55V. Η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 4 °C, ενώ το ρεύμα της διατηρείται σταθερό. Η τάση στα άκρα της διόδου θα: παραμείνει σταθερή αποκτήσει τιμή 0.56V

αποκτήσει τιμή 0.65V αποκτήσει τιμή 0.54V

15) Το ενεργειακό διάγραμμα (σχήμα 1), αντιστοιχεί σε μια επαφή:

- p-n, μέταλλου – ημιαγωγού n-type μέταλλου – ημιαγωγού p-type
 μονωτή – ημιαγωγού n-type μονωτή – ημιαγωγού p-type.

16) Σε NMOS τύπου προσαύξεσης το υπόστρωμα είναι:

- n-Si p-Si SiO₂

17) Στα MOS η πύλη είναι:

- λεπτό μεταλλικό στρώμα
 ημιαγωγός SiO₂

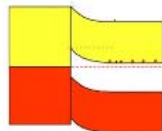
18) Η τάση κατωφλίου (V_T) ενός MOS έχει τιμή - 3.3V. Το MOS είναι: NMOS PMOS

19) Το MOS (σχήμα 2), είναι:

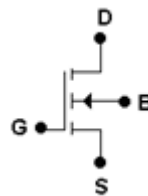
- NMOS PMOS

20) Στο σχήμα 3 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές I_D-V_{DS} για ίδιας τιμή πόλωση V_{GS} , δυο MOS. Η τιμή της λ παραμέτρου του MOS1 είναι $0.025V^{-1}$. Ποια από τις παρακάτω τιμές θεωρείται ως πιο πιθανή για την λ παράμετρο του MOS2:

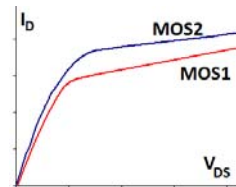
- $0.025V^{-1}$ $0.033V^{-1}$ $0.018V^{-1}$



Σχήμα 1



Σχήμα 2



Σχήμα 3