

3. Επαφή p-n

Προαπαιτούμενες γνώσεις

- ✓ Επαφή p-n
- ✓ Στάθμη Fermi
- ✓ Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης
- ✓ Ορθή και ανάστροφη πόλωση

Περιεχόμενο της άσκησης

Οι επαφές p-n παρουσιάζουν σημαντικό ενδιαφέρον επειδή βρίσκουν εφαρμογή στη σύγχρονη ηλεκτρονική (δίοδοι φώρασης, μεταβλητοί πυκνωτές, δίοδοι που εκπέμπουν φως όπως τα LED, κ.λ.π.). Η θεωρία της λειτουργίας τους αποτελεί τη βάση της κατανόησης της φυσικής των διατάξεων ημιαγωγού καθώς και έναν από τους βασικούς τρόπους χαρακτηρισμού και συνεπώς ελέγχου ποιότητας των ημιαγωγών.

Στόχος της παρούσας άσκησης είναι καταρχήν η κατανόηση της λειτουργίας της διάταξης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη λήψη των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της, δηλαδή την εξάρτηση του ρεύματος από την εφαρμοζόμενη τάση ορθής πόλωσης καθώς και από την εξάρτηση της χωρητικότητας της περιοχής απογύμνωσης (περιοχής φορτίου χώρου) από την εφαρμοζόμενη τάση ανάστροφης πόλωσης της επαφής.

Συγκεκριμένα, η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης ορθής πόλωσης επιτρέπει την κατανόηση και προσδιορισμό των μηχανισμών επανασύνδεσης των ηλεκτρονίων - οπών.

Αντίστοιχα, η χαρακτηριστική χωρητικότητας-τάσης ανάστροφης πόλωσης, επειδή διαμορφώνει το εύρος της περιοχής απογύμνωσης, επιτρέπει τον προσδιορισμό του προφίλ των προσμίξεων του ημιαγωγού καθώς και του φραγμού δυναμικού της επαφής.

Προτεινόμενη βιβλιογραφία

- 1) Π. Βαρώτσος
Κ. Αλεξόπουλος.
«Φυσικής Στερεάς Κατάστασης»
- 2) Γ. Τόμπρας
«Εισαγωγή στην Ηλεκτρονική»
- 3) Παπασταματίου-Ροδίτη
«Φυσική των Ημιαγωγών»-
(Ημιαγωγικές διατάξεις).

1. Επαφή P-N

Οι επαφές P-N παρουσιάζουν σημαντικό ενδιαφέρον επειδή βρίσκουν εφαρμογή στη σύγχρονη ηλεκτρονική (δίοδοι φώρασης, δίοδοι που εκπέμπουν φως όπως τα LED, κ.λ.π.). Η θεωρία τους αποτελεί θεμέλιο της φυσικής των διατάξεων ημιαγωγού καθώς και έναν από τους βασικούς τρόπους χαρακτηρισμού και συνεπώς ελέγχου ποιότητας των ημιαγωγών.

Για να κατανοήσουμε το τελευταίο, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι ένας ημιαγωγός δεν είναι δυνατόν να είναι τέλειος. Σε έναν ημιαγωγό δημιουργούνται πάντα πλεγματικές ατέλειες, που αποτελούνται από πλεγματικά κενά ή μεσοπλεγματικά άτομα του ιδίου του ημιαγωγού, και υπάρχουν οι επιθυμητές και οι ανεπιθύμητες προσμίξεις. Οι πλεγματικές ατέλειες όταν ενεργοποιούνται συμπεριφέρονται σαν δότες ή αποδέκτες ανάλογα με το φορτίο τους. Οι ενεργοποιημένες ατέλειες και οι ανεπιθύμητες προσμίξεις μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τις ηλεκτρικές ιδιότητες ενός ημιαγωγού, με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται, πολλές φορές, μεγάλες αποκλίσεις από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Η ποιότητα ενός ημιαγωγού ελέγχεται με δύο τρόπους:

1. το φαινόμενο Hall και η εξάρτησή του, μαζί με την αγωγιμότητα, από τη θερμοκρασία. Από αυτό υπολογίζεται η συγκέντρωση και η ευκινησία των ελεύθερων φορέων από τη θερμοκρασία και
2. μελέτη που βασίζεται στην επαφή P-N. Από αυτή υπολογίζεται η κατανομή των προσμίξεων και των ηλεκτρικά ενεργών ατελειών σε έναν ημιαγωγό.

Η επαφή P-N αποτελεί μία χαρακτηριστική περίπτωση ενός μη ομογενούς ημιαγωγού. Σε αυτή την περίπτωση η συγκέντρωση των προσμίξεων μεταβάλλεται μόνο κατά μία καθορισμένη κατεύθυνση, έστω στον άξονα x . Επιπλέον η μεταβολή αυτή είναι απότομη και γίνεται στη θέση $x=0$ (απότομη επαφή). Έτσι για αρνητικές τιμές του x η συγκέντρωση των αποδεκτών είναι υψηλή και ο ημιαγωγός είναι P-τύπου ενώ για θετικές τιμές του x η συγκέντρωση των δοτών είναι υψηλή και ο ημιαγωγός είναι N-τύπου. Στην περιοχή της επαφής, του N-τύπου ημιαγωγού με τον P-τύπου ημιαγωγό ($x=0$), η ασυνέχεια της στάθμης Fermi αποκαθίσταται με μετακίνηση ελεύθερων ηλεκτρονίων προς τον P-τύπου ημιαγωγό και ελεύθερων οπών προς τον N-τύπου ημιαγωγό. Η μετακίνηση αυτών των φορτίων αντισταθμίζεται με τη δημιουργία ενός ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή της επαφής που παρεμποδίζει την περαιτέρω διάχυση των ελεύθερων φορέων. Με την μετακίνηση των φορέων και τη δημιουργία του ηλεκτρικού πεδίου η στάθμη Fermi είναι παντού σταθερή και το ρεύμα των ελεύθερων φορέων που διαρρέει την επαφή, σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας, είναι μηδέν.

$$J \propto \frac{\partial E_F}{\partial x} = 0$$

Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου σε κάθε σημείο του ημιαγωγού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E = \frac{1}{q} \frac{\partial E_C}{\partial x} = \frac{1}{q} \frac{\partial E_V}{\partial x}$$

Το ηλεκτρικό πεδίο σαρώνει τους ελεύθερους φορείς με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί γύρω από την επαφή μια περιοχή απογυμνωμένη από ελεύθερους φορείς, όπου παραμένουν μόνο οι δέσμιοι φορείς των ιονισμένων προσμίξεων και ατελειών. Η περιοχή αυτή ονομάζεται "περιοχή φορτίου χώρου". Η παρουσία του ηλεκτρικού πεδίου έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός φραγμού δυναμικού qV_{bi} , ο οποίος μπορεί να υπολογιστεί αν θεωρήσουμε ότι:

$$qV_n = E_C - E_F \quad \text{στον N-τύπο}$$

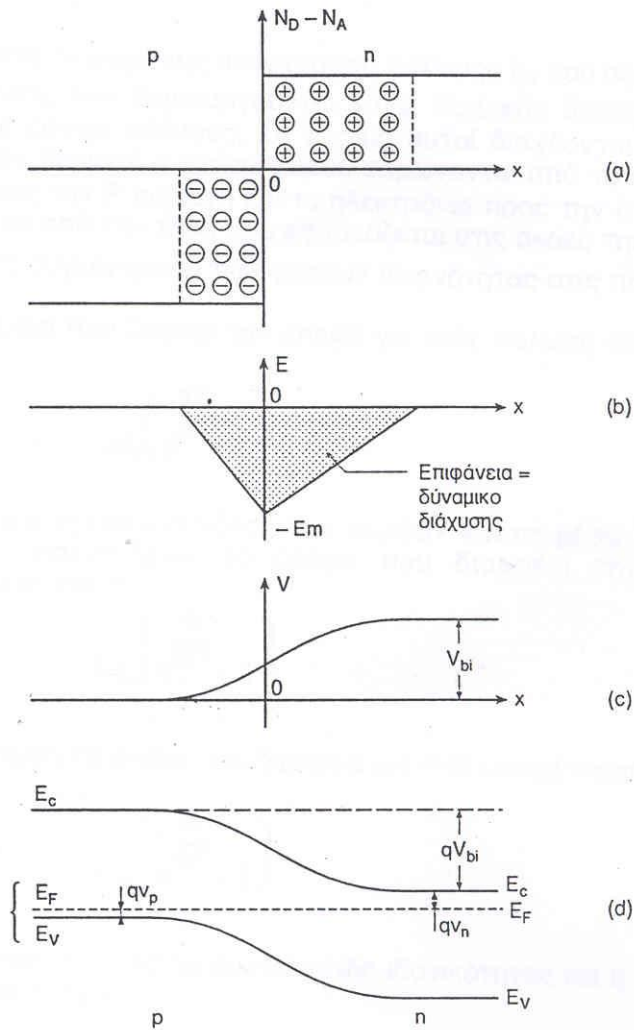
$$qV_p = E_F - E_V \quad \text{στον P-τύπο}$$

και

$$qV_{bi} = E_g - q(V_n + V_p)$$

Για να ισχύει η ουδετερότητα φορτίου στην περιοχή φορτίου χώρου θα πρέπει:

$$N_A x_p = N_D x_n$$



Απότομη p-n επαφή με θερμική ισορροπία

- κατανομή προσμείξεων
- κατανομή πεδίου
- Μεταβολή του δυναμικού με την απόσταση
- διάγραμμα ενεργειακής ζώνης

όπου x_p και x_n είναι το βάθος στο οποίο εκτείνεται η περιοχή φορτίου χώρου στον P-τύπου ημιαγωγό και N-τύπου ημιαγωγό αντίστοιχα. Αν στη συνέχεια εφαρμοστεί η εξίσωση Poisson με τους περιορισμούς που προκύπτουν από τη θεώρηση της απότομης επαφής, υπολογίζεται η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου για τον P-τύπου ημιαγωγό:

$$E(x) = -\frac{qN_A(x + x_p)}{\epsilon_s}, \quad x_p \leq x \leq 0 \quad (1)$$

και για τον N-τύπου ημιαγωγό:

$$E(x) = -\frac{qN_D(x - x_n)}{\epsilon_s}, \quad 0 \leq x \leq x_n \quad (2)$$

όπου ϵ_s είναι η διηλεκτρική σταθερά του ημιαγωγού. Από τις (1) και (2) είναι δυνατός ο υπολογισμός του πλάτους W της περιοχής φορτίου χώρου, αφού:

$$W = x_p + x_n$$

Άρα:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_{bi}} \quad (3)$$

Στην περίπτωση που:

α) η συγκέντρωση των προσμίξεων στη μία περιοχή της επαφής είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτή της άλλης περιοχής (N_B) και

β) έχει εφαρμοστεί εξωτερικά μία διαφορά δυναμικού V

η (3) γράφεται:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{V_{bi} - V}{N_B} \right)} \quad (4)$$

(4)

όπου η V είναι αρνητική για ανάστροφη πόλωση και θετική για ορθή πόλωση.

Χωρητικότητα περιοχής φορτίου χώρου

Επειδή στην περιοχή φορτίου χώρου δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς, σε αντίθεση με τον υπόλοιπο ημιαγωγό, η P-N επαφή συμπεριφέρεται σαν ένας πυκνωτής που οι οπλισμοί του απέχουν απόσταση W . Η χωρητικότητα ενός τέτοιου πυκνωτή μπορεί να υπολογιστεί από τη γενική σχέση:

$$C = \frac{dQ}{dV} \quad (5)$$

όπου dQ είναι η στοιχειώδης αύξηση του φορτίου ($= qN_B WS$) που αντιστοιχεί σε αύξηση του εφαρμοζόμενου εξωτερικού δυναμικού dV ($= \frac{qN_B W^2}{2\epsilon_s}$), όπου S είναι το εμβαδόν της

επιφάνειας της επαφής. Τελικά:

$$C = S \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_B}{2} \left(\frac{1}{V_{bi} - V} \right)} \quad (6)$$

Είναι προφανές ότι η χάραξη της

$$\frac{1}{C^2} = f(V) \quad (7)$$

έχει κλίση που εξαρτάται από το N_B και τετμημένη στην αρχή που είναι ο φραγμός δυναμικού της επαφής. Πρέπει να σημειωθεί ότι η γραφική παράσταση της παραπάνω σχέσης είναι ευθεία μόνο αν το N_B είναι σταθερό. Σε αντίθετη περίπτωση η κλίση της (7) είναι:

$$\frac{d \frac{1}{C^2}}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_s N_B (W)} \quad (8)$$

και παρέχει τη δυνατότητα προσδιορισμού της κατανομής των προσμίξεων, μιας και το

$$W = \frac{\epsilon_s S}{C(V)} \quad (9)$$

που εξαρτάται από το V μπορεί να υπολογιστεί άμεσα.

Χαρακτηριστική ρεύματος-τάσεως (I-V)

Όταν σε μία P-N επαφή εφαρμοστεί ορθή πόλωση V , το δυναμικό του P-τύπου ημιαγωγού αυξάνεται σε σχέση με αυτό του N-τύπου ημιαγωγού: Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ελάττωση του φραγμού κατά ποσό ίσο με qV . Έτσι το ύψος του φραγμού δυναμικού ελαττώνεται από qV_{bi} σε $q(V_{bi} - V)$ και το πλάτος της περιοχής φορτίου χώρου από $W(0)$ σε $W(V)$.

Για τον υπολογισμό της χαρακτηριστικής ρεύματος - τάσεως μιας P-N επαφής πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι το ολικό ρεύμα έχει δύο συνιστώσες:

1. το ρεύμα κατά τη φορά της ορθής πόλωσης

$$I_F = I_0 e^{\frac{qV}{kT}}$$

που αποτελείται από φορείς πλειονότητας που υπερπηδούν το φραγμό δυναμικού. Το ρεύμα των φορέων πλειονότητας (ηλεκτρονίων της N που ρέουν προς την P περιοχή και οπών της P που ρέουν προς την N περιοχή) εξαρτάται εκθετικά από την τάση V που εφαρμόζεται στις άκρες της επαφής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πιθανότητα ένας φορέας να υπερπηδήσει το φραγμό δυναμικού είναι ανάλογη του

$$\exp\left(\frac{q(V - V_{bi})}{kT}\right)$$

και

2. το ρεύμα κατά τη φορά της ανάστροφης πόλωσης I_0 , που οφείλεται σε φορείς μειονότητας που δημιουργούνται λόγω θερμικής διέγερσης των ηλεκτρονίων της ζώνης σθένους. Οι φορείς αυτοί διαχέονται και όσοι εισχωρήσουν στην περιοχή φορτίου χώρου σαρώνονται από το ηλεκτρικό πεδίο οι οπές προς την P περιοχή και τα ηλεκτρόνια προς την N περιοχή. Το I_0 δεν εξαρτάται από την τάση που εφαρμόζεται στις άκρες της επαφής παρά μόνο από τη συγκέντρωση των φορέων μειονότητας στις περιοχές P και N.

Το ολικό ρεύμα που διαρρέει την επαφή για κάθε πόλωση δίδεται από τη σχέση:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

Στην περίπτωση που η επανασύνδεση των φορέων γίνεται μέσω ατελειών ή ανεπιθύμητων προσμίξεων το ρεύμα που διαρρέει την επαφή περιγράφεται από τη σχέση:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right)$$

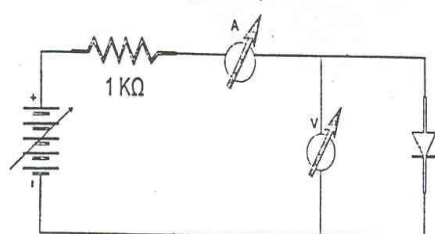
Στη γενική περίπτωση το ρεύμα που διαρρέει μια P-N επαφή περιγράφεται από τη σχέση:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right)$$

όπου ο συντελεστής "n" καλείται συντελεστής ιδανικότητας και η τιμή του κυμαίνεται στα όρια $1 \leq n \leq 2$. Είναι προφανές ότι η τιμή του συντελεστή ιδανικότητας αποτελεί δείκτη του μηχανισμού επανασύνδεσης των φορέων.

Εκτέλεση της Άσκησης

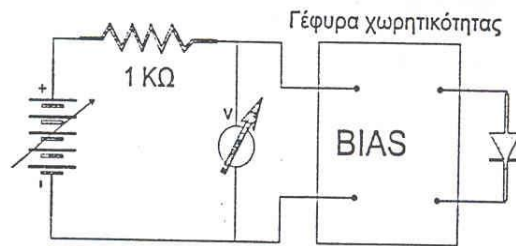
1. Εκτελούμε τη συνδεσμολογία του σχήματος. 1. Χρησιμοποιούμε ψηφιακό βολτόμετρο για τη μέτρηση της τάσης αφού πρώτα έχουμε καθορίσει το ρεύμα. Οι μετρήσεις πρέπει να καλύπτουν τουλάχιστον τρεις τουλάχιστον τάξεις μεγέθους ρεύματος από μερικά μA έως 15mA .



Σχήμα 1

2. Αποδίδουμε την $I = f(V)$ σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα. Προσδιορίζουμε τις περιοχές με διαφορετικό συντελεστή ιδανικότητας. Για τις συγκεκριμένες περιοχές προσδιορίζουμε τον συντελεστή ιδανικότητας και το αντίστοιχο I_0 . Σχολιάζουμε τα αποτελέσματα.

3. Εκτελούμε τη συνδεσμολογία του σχήματος 2 και υπολογίζουμε αρχικά την παρασιτική χωρητικότητα των καλωδίων που συνδέονται με τη δίοδο (C_{π}). Αυτό είναι απαραίτητο για το σωστό υπολογισμό των V_{bi} και N_B . Στη συνέχεια συνδέουμε τη δίοδο, εφαρμόζουμε ανάστροφη πόλωση και μετράμε τη χωρητικότητα του συστήματος "καλώδια-δίοδος". Οι μετρήσεις θα πρέπει να είναι από 0-1 V ανά 50mV και από 1-10V ανά 0.5V.



Σχήμα 2

4. Από την $1/C^2 = f(V)$ υπολογίζουμε τον φραγμό δυναμικού της P-N επαφής καθώς και τη μέση συγκέντρωση των προσμίξεων.

5. Από την κλίση της $1/C^2 = f(V)$ και τη χαρακτηριστική $C-V$ (0-1V) υπολογίζουμε την κατανομή των προσμίξεων $N_B = g(W)$. Συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με αυτό του βήματος (4).