

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ Ι

### ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΑΜΦΙΠΟΛΙΚΩΝ ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΕΠΑΦΩΝ

Η άσκηση αποτελείται από δύο τμήματα: 1) μελέτη των χαρακτηριστικών καμπύλων εισόδου και εξόδου των τρανζίστορ για σύνδεση κοινού εκπομπού και 2) υπολογισμός του στατικού κέρδους ρεύματος  $h_{FE}$ , για NPN και PNP αμφιπολικά τρανζίστορ επαφών.

#### 1. ΣΥΝΔΕΣΜΟΛΟΓΙΑ ΚΟΙΝΟΥ ΕΚΠΟΜΠΟΥ

##### Σκοπός της άσκησης

1. Χάραξη των τυπικών χαρακτηριστικών καμπύλων εισόδου και εξόδου τρανζίστορ
2. Προσεγγιστικός υπολογισμός των υβριδικών παραμέτρων
3. Κατασκευή των ισοδύναμων υβριδικών κυκλωμάτων

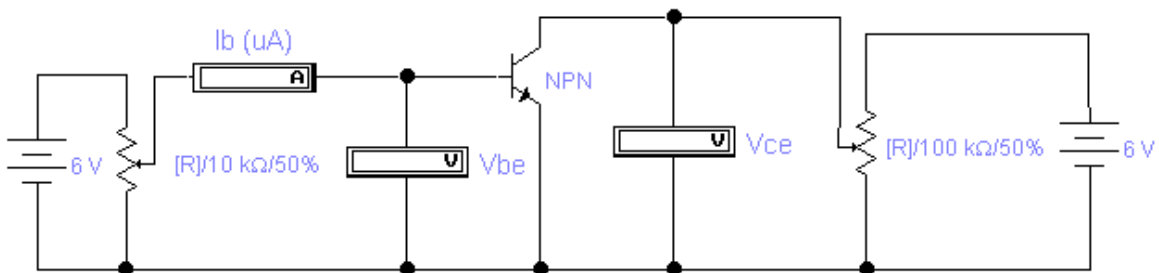
##### 1.1. Χαρακτηριστικές καμπύλες εισόδου

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες εισόδου ενός τρανζίστορ NPN έχουν τη γενική μορφή:

$$V_{BE} = f(V_{CE}, I_B)$$

Για να χαράξουμε τις καμπύλες εισόδου, διατηρούμε τη τάση εξόδου,  $V_{CE}$ , σταθερή και μεταβάλλοντας τη τάση εισόδου,  $V_{BE}$ , καταγράφουμε τις τιμές του ρεύματος βάσης,  $I_B$ .

- i. Πραγματοποιήστε το κύκλωμα του Σχήματος 1:



**Σχήμα 1:** Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού

- ii. Διατηρείστε τη τάση εξόδου  $V_{CE}$  σταθερή στα 2Volt με τη βοήθεια του ποτενσιόμετρου.

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

- iii. Μεταβάλλετε το ρεύμα της βάσης  $I_B$  από 0 έως 500 $\mu$ A με τη βοήθεια του ποτενσιόμετρου των 10k $\Omega$  παίρνοντας κάθε φορά την αντίστοιχη τιμή της τάσης εισόδου  $V_{BE}$  σε mV. Σημειώστε τα αποτελέσματα στον Πίνακα I.
- iv. Δίνουμε στην έξοδο τάση 4Volt χρησιμοποιώντας το ποτενσιόμετρο των 100k $\Omega$  και επαναλαμβάνουμε τις προηγούμενες μετρήσεις.
- v. Από τις μετρήσεις του Πίνακα I χαράζουμε σε χαρτί millimetre τη χαρακτηριστική καμπύλη εισόδου  $I_B=f(V_{BE})$  για τάση εξόδου 2 και 4Volt.
- vi. Από τις μετρήσεις του Πίνακα I και για μια τιμή του ρεύματος βάσης, να υπολογίσετε τη σύνθετη αντίσταση εισόδου,  $Z_{in}=V_{BE}/I_B$ , του τρανζίστορ.

**Πίνακας I**

	$V_{CE}=2V$	$V_{CE}=4V$
$I_B$ (i A)	$V_{BE}$ (mV)	$V_{BE}$ (mV)
500		
400		
300		
250		
200		
150		
100		
50		
25		
10		

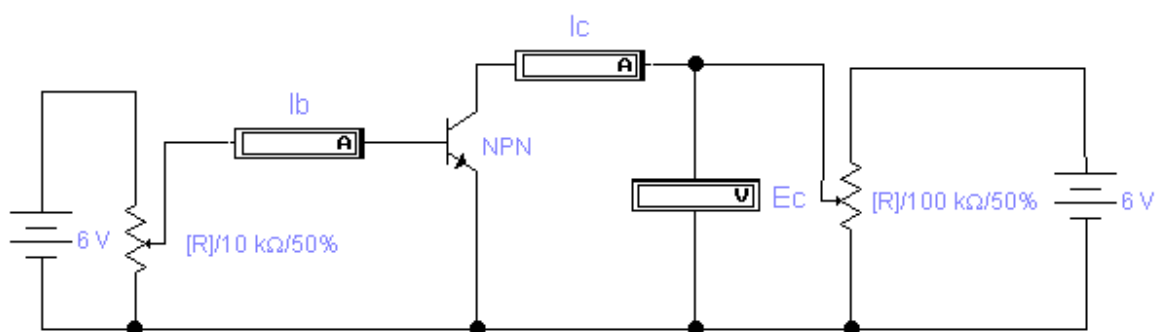
### 1.2. Χαρακτηριστικές καμπύλες εξόδου

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες εξόδου ενός τρανζίστορ NPN έχουν τη γενική μορφή:

$$I_C = f(V_{CE}, I_B)$$

Για να χαράξουμε τις καμπύλες εξόδου, διατηρούμε την ένταση του ρεύματος της βάσης  $I_B$  σταθερή και μεταβάλλοντας τη τάση εξόδου  $V_{CE}$ , καταγράφουμε τις τιμές του ρεύματος του συλλέκτη  $I_C$ .

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ



- i. Πραγματοποιήστε το κύκλωμα του Σχήματος 2.
- Σχήμα 2:** Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού
- ii. Διατηρείστε την ένταση του ρεύματος  $I_B$  σταθερή στα  $10\mu\text{A}$  με τη βοήθεια του ποτενσιόμετρου των  $10\text{k}\Omega$ .
- iii. Μεταβάλλετε βαθμιαία τη τάση εξόδου  $V_{CE}$  από  $0$  έως  $5\text{V}$  με τη βοήθεια του ποτενσιόμετρου των  $100\text{k}\Omega$ , καταγράφοντας τις αντίστοιχες τιμές της έντασης  $I_C$ . Να εξασφαλίσετε τη σταθερή τιμή της έντασης  $I_B$  για τις παραπάνω μετρήσεις. Σημειώστε τα αποτελέσματα στον Πίνακα II.
- iv. Δίνουμε στην ένταση του ρεύματος βάσης  $I_B$  την τιμή  $30\mu\text{A}$  και επαναλαμβάνουμε τις προηγούμενες μετρήσεις.
- v. Από τις μετρήσεις του Πίνακα II χαράζουμε σε χαρτί millimetre τη χαρακτηριστική καμπύλη εξόδου  $I_C=f(V_{CE})$  για ρεύματα βάσης  $10$  και  $30\mu\text{A}$ .
- vi. Από τις μετρήσεις του Πίνακα II και για μια τιμή της τάσης  $V_{CE}$ , υπολογίστε την αγωγιμότητα εξόδου,  $G_{out}=I_C/V_{CE}$ , του τρανζίστορ.

**Πίνακας II**

$V_{CE}$ (Volt)	$I_B=10\mu\text{A}$	$I_B=30\mu\text{A}$
	$I_C$ (mA)	$I_C$ (mA)
5		
4		
3		
2		
1,5		
1		
0,5		
0,3		
0,1		
0,05		

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

vii. Από τις χαρακτηριστικές καμπύλες εισόδου και εξόδου να γίνει ο πειραματικός υπολογισμός των υβριδικών παραμέτρων, που είναι:

α) η μιγαδική αντίσταση εισόδου,  $h_{ie} = \Delta V_{BE} / \Delta I_B$

β) η μιγαδική αγωγιμότητα εξόδου,  $h_{oe} = \Delta I_C / \Delta V_{CE}$

γ) η παράμετρος αναστροφής,  $h_{re} = \Delta V_{BE} / \Delta V_{CE}$  και

δ) η παράμετρος ορθής μεταφοράς  $h_{fe} = \Delta I_C / \Delta I_B$ .

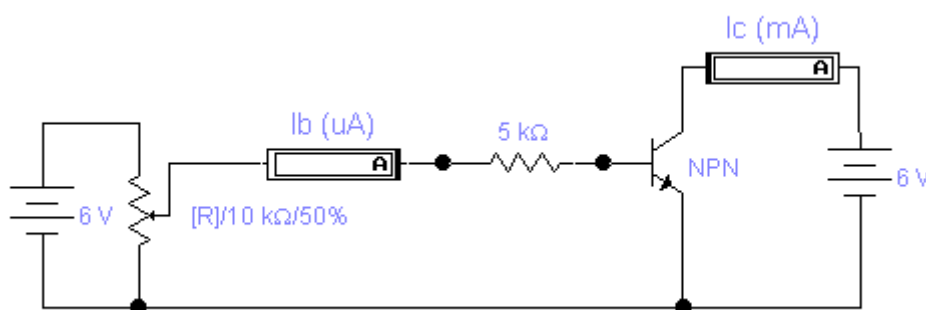
## 2. ΣΤΑΤΙΚΟ ΚΕΡΔΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ, $h_{FE}$

### Σκοπός της άσκησης

Σκοπός του δευτέρου τμήματος της άσκησης είναι να μετρηθεί το στατικό κέρδος ρεύματος  $\beta$ , που δείχνει την ενίσχυση του τρανζίστορ, μετρώντας το ρεύμα της βάσης  $I_B$  και του συλλέκτη  $I_C$ . Να γίνει ο υπολογισμός του κέρδους ρεύματος  $\alpha$  και να παρατηρηθεί το φαινόμενο Webster. Οι μετρήσεις θα πραγματοποιηθούν και στους δύο τύπους αμφιπολικών τρανζίστορ.

### 2.1. Μέτρηση του $h_{FE}$ σε τρανζίστορ NPN

- Για να μετρήσουμε το ρεύμα βάσης,  $I_B$  και το ρεύμα συλλέκτη,  $I_C$ , πραγματοποιούμε το κύκλωμα του Σχήματος 3. Γυρίστε το ποτενσιόμετρο των 10kΩ εντελώς αριστερά και σταθεροποιήστε την τάση εισόδου καθώς και την τάση εξόδου στα 6 Volt.



**Σχήμα 3:** Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού σε ένα τρανζίστορ NPN

- Ανοίξτε την πηγή της τάσης εισόδου και γυρίστε το ποτενσιόμετρο VR10kΩ σταδιακά δεξιά, καταγράφοντας τις τιμές του ρεύματος  $I_C$  του συλλέκτη για κάθε τιμή του ρεύματος  $I_B$  της βάσης. Οι τιμές του ρεύματος  $I_C$  να παίρνονται κατά προσέγγιση πρώτου δεκαδικού ψηφίου. Για καλύτερες μετρήσεις του ρεύματος  $I_C$ , ξεκινήστε τις μετρήσεις από τα 500μΑ με κατάλληλη βαθμιαία μεταβολή (βλέπε Πίνακα III).
- Με τις τιμές του ρεύματος  $I_C$  που προκύπτουν από το ii), συμπληρώστε τον Πίνακα III.

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

**Πίνακας III**

$I_B$ ( $\mu A$ )	5	10	20	30	40	50	10	15	20	25	30	40	50
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$I_C$ (mA)													

- iv. Εξετάστε την αύξηση του ρεύματος του συλλέκτη,  $I_C$  σε συνάρτηση με το ρεύμα της βάσης,  $I_B$  σχεδιάζοντας σε χαρτί millimetre τη γραφική παράσταση  $I_C=f(I_B)$ .
- v. Από την κλίση της ευθείας του παραπάνω γραφήματος, να υπολογίσετε το στατικό κέρδος ρεύματος,  $h_{FE}$  για δύο τυχαία σημεία αυτής.
- vi. Από τη γνωστή σχέση:

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad (1)$$

που συνδέει το κέρδος ρεύματος  $\beta$  για σύνδεση κοινού εκπομπού με το κέρδος ρεύματος  $\alpha$  για σύνδεση κοινής βάσης, να γίνει ο υπολογισμός του κέρδους ρεύματος  $\alpha$ . Σαν τιμή του κέρδους ρεύματος  $\beta$ , χρησιμοποιήστε την τιμή που προκύπτει από το ερώτημα 2.1.v). Η τιμή της ποσότητας  $\alpha$  να δίνετε σε προσέγγιση τρίτου δεκαδικού ψηφίου.

- vii. Τοποθετήστε τις τιμές του Πίνακα III στη γνωστή σχέση:

$$\beta = h_{FE} \equiv \frac{I_C}{I_B} \quad (2)$$

υπολογίζοντας συνεπώς το κέρδος ρεύματος σε προσέγγιση ακεραίων μονάδων. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν, να γραφούν στον Πίνακα IV.

**Πίνακας IV**

$I_B$ ( $\mu A$ )	5	10	20	30	40	50	10	15	20	25	30	40	50
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$h_{FE}$													

- viii. Να υπολογιστεί ο μέσος όρος του στατικού κέρδους ρεύματος  $\beta$ , για τις μετρήσεις του Πίνακα IV.

$$\overline{h_{FE}} = \dots\dots$$

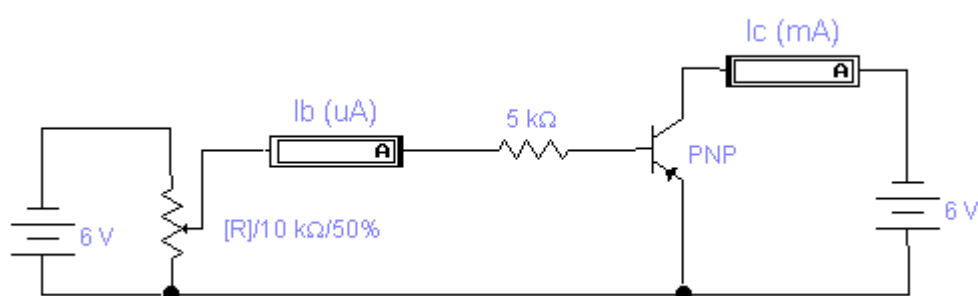
- ix. Εξετάστε την αύξηση του κέρδους ρεύματος,  $\beta = h_{FE}$ , σε συνάρτηση με το ρεύμα βάσης  $I_B$ . Σχεδιάστε σε χαρτί millimetre τη γραφική παράσταση  $h_{FE}=f(I_B)$ .
- x. Εξετάστε τη μεταβολή του κέρδους ρεύματος,  $\beta$  σε συνάρτηση με το ρεύμα συλλέκτη,  $I_C$ . Σχεδιάστε σε χαρτί millimetre τη γραφική παράσταση  $h_{FE}=f(I_C)$ .

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

**Σημείωση:** Να προσεχθεί η θερμοκρασία περιβάλλοντος, γιατί τυχόν μεταβολές της, πιθανόν να δημιουργήσουν αποκλίσεις στις πειραματικές μετρήσεις.

### 2.2. Μέτρηση του $h_{FE}$ σε τρανζίστορ PNP

- Για να μετρήσετε τα ρεύματα  $I_B$  και  $I_C$ , πραγματοποιήστε το κύκλωμα του Σχήματος 4. Γυρίστε το ποτενσιόμετρο των  $10k\Omega$  εντελώς αριστερά μέχρι το όριο και σταθεροποιήστε την τάση εισόδου και εξόδου στα  $6\text{ Volt}$ .



**Σχήμα 4:** Συνδεσμολογία κοινού εκπομπού σε ένα τρανζίστορ PNP

- Ανοίξτε τη πηγή της τάσης εισόδου και γυρίστε το ποτενσιόμετρο  $VR10k\Omega$  σταδιακά δεξιά, καταγράφοντας τις τιμές του ρεύματος  $I_C$  του συλλέκτη για κάθε τιμή του ρεύματος  $I_B$ . Οι τιμές του ρεύματος  $I_C$  να παρθούν κατά προσέγγιση πρώτου δεκαδικού ψηφίου. Για καλύτερες μετρήσεις του ρεύματος  $I_C$ , να ξεκινήσετε τις μετρήσεις από τα  $100\mu\text{A}$  με κατάλληλη βαθμιαία μεταβολή του ρεύματος  $I_B$  (βλέπε Πίνακα V).
- Με τις τιμές που προκύπτουν από το ii) για το ρεύμα  $I_C$ , συμπληρώστε τον Πίνακα V.

**Πίνακας V**

$I_B$ ( $\mu\text{A}$ )	2	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$I_C$ (mA)												

- Εξετάστε την αύξηση του ρεύματος συλλέκτη  $I_C$  σε συνάρτηση με το ρεύμα βάσης  $I_B$  σχεδιάζοντας σε χαρτί millimetre τη γραφική παράσταση  $I_C=f(I_B)$ .
- Από την κλίση της ευθείας  $I_C=f(I_B)$ , να υπολογιστεί το στατικό κέρδος ρεύματος  $h_{FE}$  για δύο τυχαία σημεία αυτής.
- Από την εξίσωση (1), να υπολογιστεί το κέρδος ρεύματος  $\alpha$ . Σαν τιμή του κέρδους ρεύματος  $\beta$ , χρησιμοποιήστε την τιμή που προκύπτει από το ερώτημα 2.2.v). Η τιμή της ποσότητας  $\alpha$  να δοθεί σε προσέγγιση τρίτου δεκαδικού ψηφίου.

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

- vii. Τοποθετήστε τις τιμές του Πίνακα V στην εξίσωση (2), και υπολογίστε έτσι το κέρδος ρεύματος σε προσέγγιση ακεραίων μονάδων, συμπληρώνοντας ταυτόχρονα τον Πίνακα VI.

Πίνακας VI

$I_B$ ( $\mu A$ )	2	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$h_{FE}$												

- viii. Να υπολογίσετε το μέσο όρο του στατικού κέρδους ρεύματος  $\beta$  για τις μετρήσεις του Πίνακα VI.

$$\overline{h_{FE}} = \dots\dots$$

- ix. Εξετάστε την αύξηση του κέρδους ρεύματος  $\beta = h_{FE}$  σε συνάρτηση με το ρεύμα βάσης  $I_B$ , και στη συνέχεια να σχεδιάσετε σε χαρτί millimetre τη γραφική παράσταση  $h_{FE}=f(I_B)$ .
- x. Να εξετάστε τη μεταβολή του κέρδους ρεύματος  $\beta$  σε συνάρτηση με το ρεύμα συλλέκτη  $I_C$ . Στη συνέχεια σχεδιάστε σε χαρτί millimetre τη γραφική παράσταση  $h_{FE}=f(I_C)$ .
- xi. Τέλος, να γίνει σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων για την ενίσχυση ρεύματος που αφορούν και στους δύο τύπους τρανζίστορ, και να δοθεί κατάλληλη αιτιολόγηση των διαφορών που προκύπτουν.

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ II

### ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ I-V ΔΙΟΔΩΝ SCHOTTKY ΑΠΟ ΠΥΡΙΤΙΟ

#### A) ΣΚΟΠΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

Μελέτη των χαρακτηριστικών ρεύματος-τάσης (I-V) διόδων Schottky από πυρίτιο n- ή p- τύπου.

#### B) ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Όταν ένα μέταλλο έρθει σε επαφή με έναν ημιαγωγό, τα επίπεδα Fermi των δύο υλικών ευθυγραμμίζονται. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίζεται ένα φράγμα δυναμικού (φράγμα Schottky) στην επιφάνεια του ημιαγωγού, το οποίο για τα ηλεκτρόνια είναι ίσο με τη διαφορά ανάμεσα στην ενέργεια του πυθμένα της ταινίας αγωγιμότητας και στην ενέργεια Fermi:

$$\Phi_{Bn} = E_C - E_F,$$

ενώ για τις οπές είναι ίσο με τη διαφορά ανάμεσα στην ενέργεια Fermi και στην ενέργεια της κορυφής της ταινίας σθένους:

$$\Phi_{Bp} = E_F - E_V$$

Αυτό το δυναμικό προέρχεται από τη διαφορά ανάμεσα στα έργα εξόδου του μετάλλου  $\Phi_M$  και του ημιαγωγού  $X_S$  και είναι ίσο με:

$$\Phi_{Bn} = \Phi_M - X_S \quad \text{για ημιαγωγό τύπου n, και}$$

$$\Phi_{Bp} = E_G - (\Phi_M - X_S) \quad \text{για ημιαγωγό τύπου p}$$

Η διαφορά δυναμικού  $V_{bi} = \Phi_M - V_n$ , όπου  $V_n = E_C - E_F$ , στο εσωτερικό του ημιαγωγού, ονομάζεται δυναμικό διάχυσης.

Μέσα στον ημιαγωγό και κοντά στην επιφάνειά του, αναπτύσσεται μία περιοχή φορτίων χώρου (θετικών για ημιαγωγό τύπου n και αρνητικών για ημιαγωγό τύπου p), το εύρος της οποίας για μηδενική τάση πόλωσης εξαρτάται από το ύψος του φράγματος Schottky και από τη συγκέντρωση των προσμίξεων στον ημιαγωγό. Η περιοχή αυτή ονομάζεται και περιοχή απογύμνωσης φορέων.

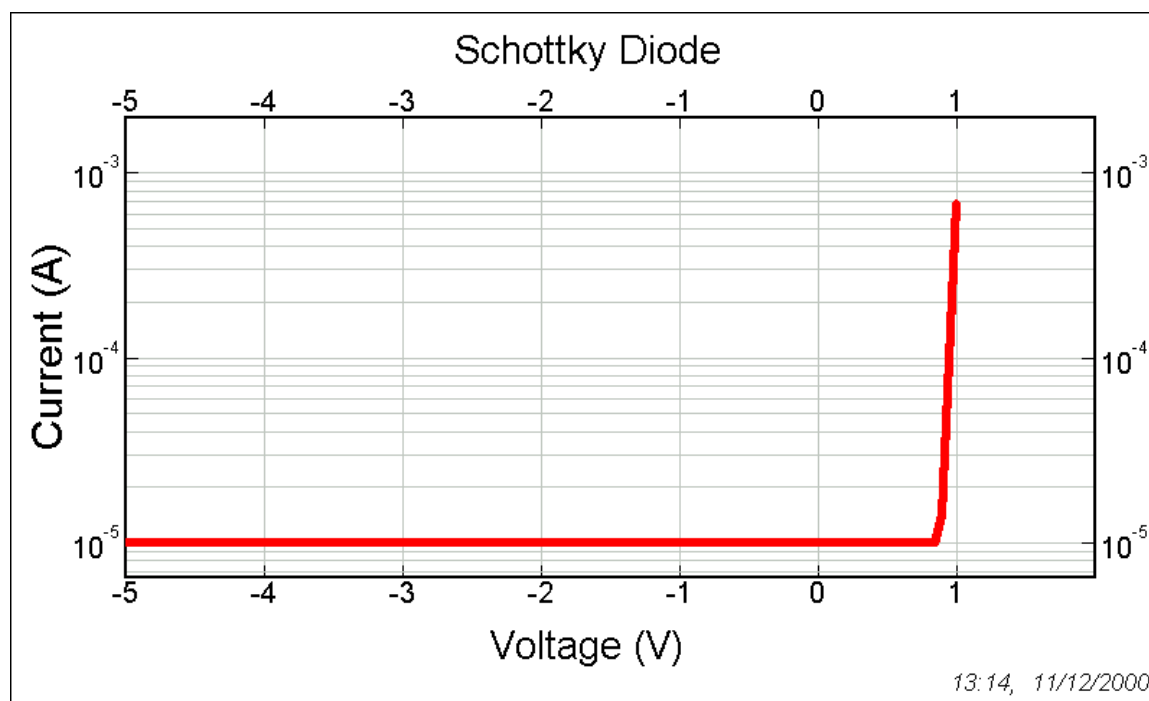
Η θεωρία του Schottky ισχύει για την ιδανική επαφή μετάλλου-ημιαγωγού, και προϋποθέτει απουσία επιφανειακών καταστάσεων. Στην πραγματικότητα όμως στην επιφάνεια του ημιαγωγού υπάρχει μία μεγάλη πυκνότητα επιφανειακών καταστάσεων οι οποίες "καρφώνουν" το επίπεδο Fermi και έτσι καθιστούν συχνά το ύψος του φράγματος Schottky ανεξάρτητο από το έργο εξόδου του μετάλλου. Στην παρούσα



## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

εργαστηριακή άσκηση χρησιμοποιούνται δίοδοι Schottky από πυρίτιο, γιατί το πυρίτιο χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά χαμηλή συγκέντρωση επιφανειακών καταστάσεων, οπότε το μοντέλο Schottky ισχύει ικανοποιητικά.

Μία δίοδος Schottky, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 (ιχνογράφο καμπυλών), συμπεριφέρεται σαν ανορθωτής. Για θετικές τιμές της τάσης  $V$ , τέτοιες ώστε  $qV > \Phi_B$ , έχουμε αγωγή του ρεύματος, ενώ για αρνητικές έχουμε αποκοπή.



**Σχήμα 1:** Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης, κατά την ορθή και την ανάστροφη τάση πόλωσης

Αυτό συμβαίνει γιατί η ενέργεια Fermi στην προς τα πρόσω (ορθή) τάση πόλωσης  $V_F$ , ανεβαίνει (σε ημιαγωγό τύπου n) κατά  $qV_F$ , οπότε τα ηλεκτρόνια πρέπει να υπερπηδήσουν ένα μικρότερο φράγμα δυναμικού ( $\Phi_B - qV_F$ ). Αντίθετα, στην ανάστροφη τάση πόλωσης,  $V_R$ , η στάθμη Fermi κατεβαίνει κατά  $qV_R$ , οπότε τα ηλεκτρόνια "βλέπουν" ένα φράγμα δυναμικού ( $\Phi_B + qV_R$ ). Στο Σχήμα 2 δείχνονται τα ενεργειακά χάσματα για επαφές Schottky σε ημιαγωγούς n και p κάτω από διαφορετικές συνθήκες πόλωσης.

Ο κύριος μηχανισμός μεταφοράς φορέων σε μία δίοδο Schottky πυρίτιου και για θερμοκρασίες κοντά στην θερμοκρασία δωματίου είναι το **θερμιονικό φαινόμενο**: Οι φορείς (ηλεκτρόνια ή οπές) οι οποίοι έχουν την απαραίτητη ενέργεια υπερπηδούν το φράγμα. Το θερμιονικό φαινόμενο δίνεται από τη σχέση:

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

---

$$I = A^* S T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV_F}{kT}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

όπου  $A^*$  είναι η σταθερά του Richardson,  $S$  η επιφάνεια της διόδου,  $T$  η θερμοκρασία σε Kelvin,  $q$  το φορτίο του ηλεκτρονίου,  $k$  η σταθερά του Boltzman

Από πειραματική όμως σκοπιά, οι χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης μιας διόδου Schottky υπακούουν στη σχέση:

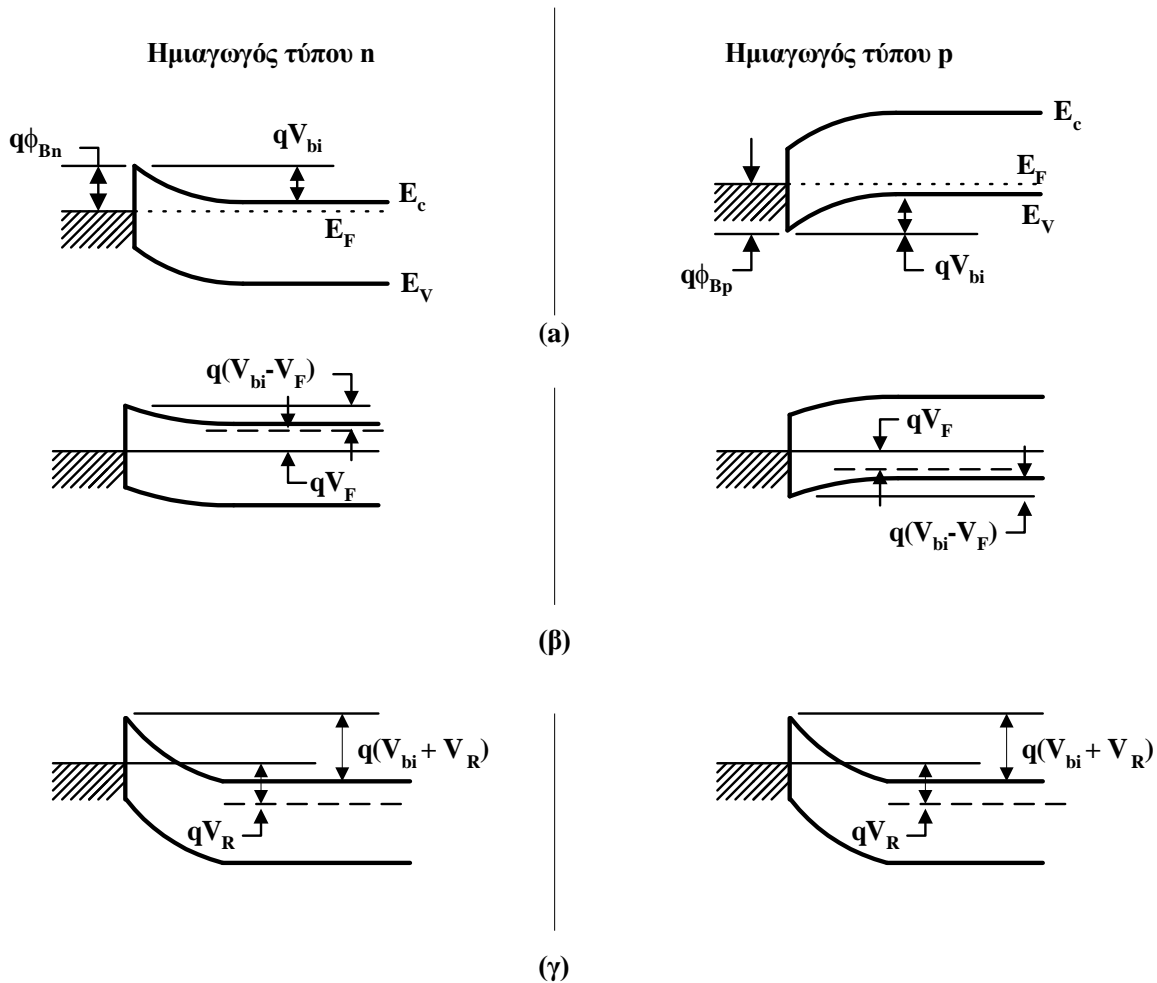
$$I = A^* S T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV_F}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

ή

$$I = I_s \left[ \exp\left(\frac{qV_F}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

όπου  $I_s$  είναι το ρεύμα κόρου (θεωρητικά το  $I_s$  ισούται με το ρεύμα  $I$ , σε ανάστροφη πόλωση δηλ, όταν  $V_R \gg nkT$ ) και  $n$  ο παράγοντας ιδανικότητας. Για  $n=1$ , ο μηχανισμός μεταφοράς είναι καθαρά θερμοϊονικός. Για  $n>1$ , έχουμε απόκλιση από τη θερμοϊονική συμπεριφορά και συμμετοχή άλλων μηχανισμών στη μεταφορά φορέων μέσω του φράγματος. Τέτοιοι μηχανισμοί είναι: α) η μεταφορά με το “φαινόμενο σήραγγας”, β) η γένεση- ανασύζευξη στην περιοχή φορτίων χώρου, και γ) η ανασύζευξη στην ουδέτερη περιοχή.

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ



**Σχήμα 2:** Ενεργειακά διαγράμματα διόδου Schottky ημιαγωγού n και p τύπου κάτω από διαφορετικές συνθήκες πόλωσης: (a) μηδενική πόλωση, (b) προς τα πρόσω πόλωση, (c) ανάστροφη πόλωση.

Για τιμές της προς τα πρόσω τάσης μεγαλύτερες από  $\sim 3kT/q$ , η μονάδα στη σχέση (3) γίνεται αμελητέα μπροστά στον εκθετικό όρο, οπότε και παραλείπεται. Έτσι η σχέση (3), γίνεται:

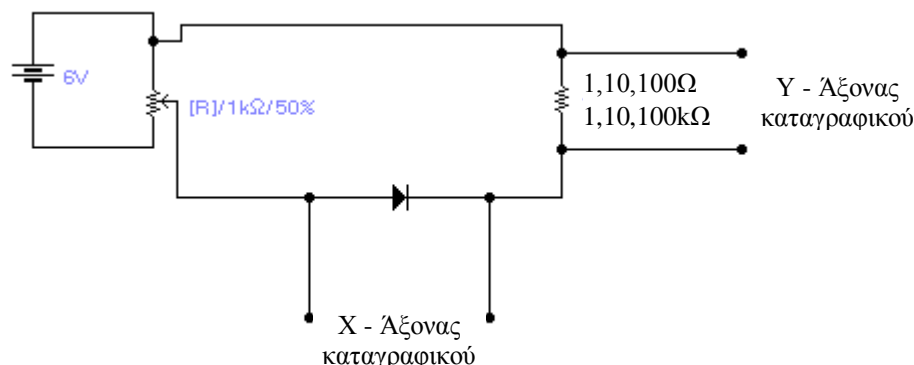
$$I = I_s \cdot \exp\left(\frac{qV_F}{nkT}\right) \quad (4)$$

### Γ) ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για να μετρήσουμε τις χαρακτηριστικές I-V, κατασκευάζουμε το κύκλωμα του Σχήματος 3. Το κύκλωμα σχεδιάζεται έτσι ώστε η τάση που εφαρμόζεται στη δίοδο, να εμφανίζεται στον άξονα x του καταγραφικού ενώ το ρεύμα στον y. Η τιμή του ρεύματος της διόδου βρίσκεται μετρώντας την πτώση τάσης σε μία αντίσταση R που είναι συνδεδεμένη σε σειρά με τη δίοδο, διαιρώντας αυτή με την τιμή της αντίστασης. Όπως φαίνεται στο κύκλωμα του Σχήματος 3, έχουμε τη δυνατότητα να επιλέξουμε την R με τιμές από  $1\Omega$  έως  $100k\Omega$ , δηλαδή να μεταβάλλουμε το ρεύμα που διαρρέει τη δίοδο κατά πέντε (5) τάξεις μεγέθους. Έτσι, καταγράφοντας για κάθε δίοδο μία ομάδα καμπύλων I-V σε συνθήκες προς τα πρόσω τάση πόλωσης, μπορούμε να πάρουμε την

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

εκθετική μεταβολή του ρεύματος που δίνεται από τη σχέση 2. Η κάθε καμπύλη αντιστοιχεί σε διαφορετική αντίσταση αλλάζοντας την τάση της διόδου με ένα ποτενσιόμετρο.



**Σχήμα 3:** Κύκλωμα μέτρησης ρεύματος-τάσης

Χρησιμοποιώντας αυτές τις καμπύλες κάνουμε έναν πίνακα όπου αναγράφονται οι τιμές του ρεύματος για τις αντίστοιχες τιμές της τάσης. Για να μετρήσουμε τις ανάστροφες χαρακτηριστικές, ακολουθούμε την ίδια διαδικασία αλλάζοντας πολικότητα στο τροφοδοτικό. Επειδή το ανάστροφο ρεύμα είναι σχεδόν σταθερό (Σχήμα 2), μία τιμή της αντίστασης μας αρκεί για να πραγματοποιήσουμε τη μέτρηση. Συνήθως επιλέγουμε  $R=10k\Omega$ .

### Δ) ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

- 1) Με βάση τον Πίνακα που καταρτίσαμε, σχεδιάζουμε την I-V χαρακτηριστική της προς μελέτη διόδου, τοποθετώντας στον **άξονα Y** το λογάριθμο της τιμής του ρεύματος.
- 2) Από την κλίση του γραμμικού τμήματος του παραπάνω διαγράμματος και με βάση τη σχέση (4), υπολογίστε τον παράγοντα ιδανικότητας  $\eta$  της διόδου.
- 3) Από την τομή του γραμμικού τμήματος του διαγράμματος με τον άξονα του ρεύματος και με βάση τη σχέση (2), υπολογίστε το ύψος φραγμού  $\Phi_B$ .

### Δίνονται:

$A^*=266Acm^{-2}K^{-2}$  για πυρίτιο τύπου n

$A^*=79Acm^{-2}K^{-2}$  για πυρίτιο τύπου p

$kT_{(300K)}=0,026V$

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ ΙΙΙ**

**ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ C-V ΔΙΟΔΩΝ SCHOTTKY**  
**ΑΠΟ ΠΥΡΙΤΙΟ**

**A) ΣΚΟΠΟΣ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ**

Μελέτη των χαρακτηριστικών χωρητικότητας-τάσης (C-V) διόδων Schottky από πυρίτιο n- ή p- τύπου

**B) ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ**

Η χωρητικότητα μιας επαφής Schottky προέρχεται από την περιοχή άντλησης στην επιφάνεια του ημιαγωγού και δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{dQ_s \cdot S}{dV} = \frac{\epsilon_o \epsilon_s \cdot S}{W} \quad (1)$$

όπου  $dQ$  είναι η στοιχειώδης μεταβολή των φορτίων χώρου για στοιχειώδη μεταβολή της εφαρμοζόμενης τάσης κατά  $dV$ ,  $S$  η επιφάνεια της διόδου,  $\epsilon_o$  η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού,  $\epsilon_s$  η ηλεκτρική διαπερατότητα του ημιαγωγού και  $W$  το εύρος της περιοχής φορτίων χώρου.

Για σταθερή συγκέντρωση φορέων  $N$  ισχύει:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_o \epsilon_s}{qN} (V_{bi} - V_D)} \quad (2)$$

και

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V_D)}{S^2 q \epsilon_o \epsilon_s N} \quad (3)$$

όπου  $V_D$  είναι η εφαρμοζόμενη τάση,  $V_{bi}$  το δυναμικό διάχυσης,  $T$  η θερμοκρασία σε Kelvin,  $q$  το φορτίο του ηλεκτρονίου και  $k$  η σταθερά του Boltzman.

Γνωρίζοντας ότι, το ύψος του φραγμού  $\Phi_B$  συνδέεται με το δυναμικό διάχυσης μέσω της σχέσης:

$$\Phi_{Bn} = V_b + V_n \quad \text{όπου} \quad V_n = |E_C - E_F| \quad \text{για ημιαγωγό τύπου n} \quad (4a)$$

και

$$\Phi_{Bp} = V_b + V_p \quad \text{όπου} \quad V_p = |E_F - E_V| \quad \text{για ημιαγωγό τύπου p} \quad (4b)$$

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

Επίσης, ισχύει ότι:

$$V_n = kT \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right) \quad \text{και} \quad V_p = kT \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right) \quad (5)$$

όπου  $N_C$  και  $N_V$  είναι η ενεργός πυκνότητα κβαντικών καταστάσεων στη ταινία σθένους και στη ταινία αγωγιμότητας, αντίστοιχα, ενώ  $N_D$  και  $N_A$  η συγκέντρωση των φορέων (δοτών και αποδεκτών, για ημιαγωγούς n και p τύπου, αντίστοιχα).

### Γ) ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών χωρητικότητας-τάσης, χρησιμοποιούμε, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1, ένα τροφοδοτικό τάσης και ένα μετρητή χωρητικότητας. Η μέτρηση της χωρητικότητας γίνεται με την υπέρθεση μιας μικρής εναλλασσόμενης τάσης στην εφαρμοζόμενη DC πόλωση.

Πολώνουμε τη δίοδο **ανάστροφα** και καταγράφουμε τις τιμές της χωρητικότητας για τις αντίστοιχες τιμές της ανάστροφης τάσης πόλωσης. Προσέχουμε να μην υπερβούμε την τάση των ~6V, γιατί θα έχουμε διάτρηση (breakdown) της προς μέτρηση δίοδου. **Η ανάστροφη πόλωση γίνεται εύκολα αντιληπτή, γιατί παρατηρείται μείωση της τιμής της χωρητικότητας.**



**Σχήμα 1:** Κύκλωμα μέτρησης χωρητικότητας-τάσης

### Δ) ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

- 1) Με βάση τις τιμές της χωρητικότητας που μετρήσαμε, κατασκευάζουμε:
  - το διάγραμμα C-V
  - το διάγραμμα  $1/C^2$ -V
- 2) Από την κλίση του γραμμικού τμήματος (ευθείας) στο διάγραμμα  $1/C^2$ -V και με βάση τη σχέση (3), υπολογίζουμε τη συγκέντρωση των φορέων στον ημιαγωγό.
- 3) Από την τομή της ευθείας  $1/C^2$ -V με τον άξονα της τάσης και με βάση πάλι τη σχέση (3), υπολογίζουμε το δυναμικό διάχυσης.

## ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

---

4) Τέλος, από τις Σχέσεις (4) και (5) υπολογίζουμε το ύψος φραγμού Schottky  $\Phi_B$ .

**Δίνονται:**

$$\epsilon_0 \epsilon_s = 1,05 \times 10^{-12} \text{F/cm}$$

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

$$N_V = 1,04 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$$

$$kT_{(300\text{K})} = 0,026 \text{V}$$

$$q = 1,6 \times 10^{-19} \text{C}$$