

# ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ Ι

## ΕΙΔΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ - ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΧΑΣΜΑ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

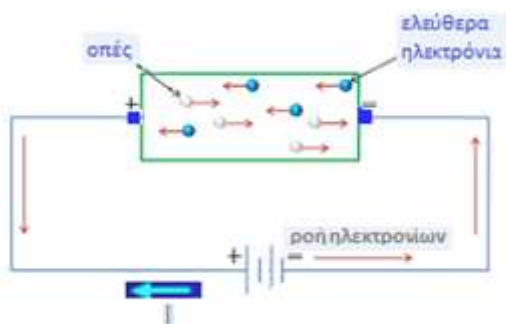
### Μετρήσεις αντίστασης $R(T)$ – ειδική αγωγιμότητα $\sigma(T)$ -

#### 1.1. Βασικές έννοιες

Ημιαγωγός, μονοκρυσταλλικό υλικό, ενεργειακό χάσμα, ενδογενείς (καθαροί) ημιαγωγοί, εξωγενείς ημιαγωγοί (με προσμίξεις), ενδογενής αγωγιμότητα, εξωγενής αγωγιμότητα, φορείς ηλεκτρικού φορτίου (ηλεκτρόνια, οπές).

#### 1.2. Αρχή -εργασία πειράματος

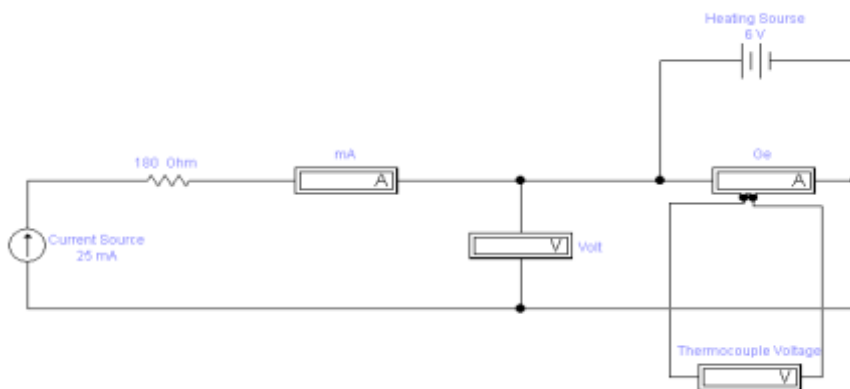
Στο πείραμα θα μετρήσουμε την αντίσταση  $R$  ενός δείγματος ημιαγωγού από γερμάνιο (καθαρό ή εμπλουτισμένο με προσμίξεις) σε διαφορετικές θερμοκρασίες  $T$ , θα υπολογίσουμε την ειδική αγωγιμότητα  $\sigma(T)$  και από την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος του διαγράμματος του λογαρίθμου του  $\sigma(T)$  ως προς  $1/T$ , θα βρούμε το ενεργειακό χάσμα του δείγματος. Στα άκρα του ημιαγωγικού πλακιδίου είναι κατασκευασμένες δύο μεταλλικές επαφές από αλουμίνιο διαμέσου των οποίων το δείγμα διαρρέεται από σταθερό ρεύμα (βλέπε το παρακάτω Σχήμα για δείγμα από καθαρό ημιαγωγό).

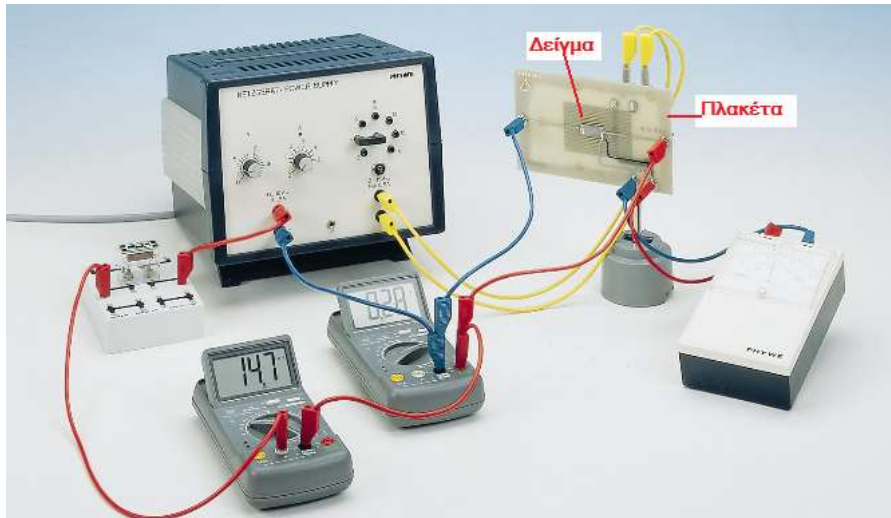


**Σχήμα 1.1** Ο κρύσταλλος από καθαρό γερμάνιο βρίσκεται σε ηλεκτρικό πεδίο. Οι οπές και τα ηλεκτρόνια κινούνται αντίρροπα μέσα στον κρύσταλλο και δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα (το ρεύμα των οπών προστίθεται στο ρεύμα ηλεκτρονίων επειδή έχουν ίδια κατεύθυνση).

#### 1.3 Διαδικασία πειράματος

Στο πείραμα μετρούμε την αντίσταση  $R$  ενός δείγματος γερμανίου Σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου (καθαρό ή εμπλουτισμένο με προσμίξεις), σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Στο Σχήμα 1.2 απεικονίζονται το κύκλωμα και το σύστημα για τη μέτρηση της αντίστασης.





**Σχήμα 1.2** Απεικόνιση του κυκλώματος και της διάταξης για τη μέτρηση της αντίστασης σε διαφορετικές θερμοκρασίες ενός δείγματος γερμανίου.

Στα άκρα του δείγματος (κατά μήκος) είναι κατασκευασμένες δύο μεταλλικές επαφές από αλουμίνιο, διαμέσου των οποίων το δείγμα διαρρέεται από σταθερό ρεύμα που τροφοδοτείται από σταθερή πηγή ρεύματος, που το μετρούμε με ένα ψηφιακό πολύμετρο. Για την προστασία του δείγματος, δεν πρέπει να ξεπεράσουμε τα 30mA, συνδέουμε σε σειρά μία αντίσταση των 180Ω (αντίσταση άνθρακα (1W 5%) για τον περιορισμό του ρεύματος στο δείγμα. Μετρούμε την πτώση τάσης κατά μήκος του δείγματος με ένα ψηφιακό πολύμετρο. Επιλέγουμε μία τιμή ρεύματος τέτοια ώστε να βρισκόμαστε πάντα στη γραμμική περιοχή ρεύματος-τάσης. Η αγωγιμότητα  $\sigma$  του πλακιδίου γερμανίου με διαστάσεις  $L=20\text{mm}$ ,  $w=10\text{mm}$ ,  $d=1\text{mm}$ , βρίσκεται ως εξής:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{L}{A \cdot R} = \frac{L}{w \cdot d} \cdot \frac{I}{V} \left( \frac{1}{\Omega \cdot \text{m}} \right) \quad (1.1)$$

όπου  $\rho$  είναι η ειδική αντίσταση,  $L$  το μήκος και  $A=w \cdot d$  η διατομή του δείγματος,  $I$  η ένταση του ρεύματος και  $V$  η τάση.

Η θέρμανση του δείγματος γίνεται με τη βοήθεια ενός θερμαντικού στοιχείου με τη μορφή σπείρας από κράμα Ni/Cr το οποίο είναι ενσωματωμένο πάνω στην πλακέτα (πλακέτα τύπου 1) στην πίσω πλευρά του δείγματος και τροφοδοτείται από εξωτερική AC τάση (βλέπε Σχήμα 1.2). Η θερμοκρασία του δείγματος μετράται με ένα θερμοζεύγος από Cu/CuNi σε επαφή με το δείγμα, με τη μορφή διαφοράς τάσης,  $V_{Thermal}$  (που μετράται με ένα βολτόμετρο σε  $\mu\text{V}$ ) και μπορεί να μεταφραστεί σε απόλυτη θερμοκρασία (K) από τη σχέση:

$$T_{\text{δείγματος}} (K) = \frac{V_{Thermal} (\mu\text{V})}{a} + T_0 (K) \quad (1.2)$$

όπου  $T_0$  είναι η θερμοκρασία χώρου σε K και  $a = 40 \mu\text{V}/\text{K}$

Για να φθάσει το δείγμα στην εκάστοτε θερμοκρασία πρέπει να θερμαίνεται αργά, εφαρμόζοντας αρχικά τάση 2V, μετά 4V και τελικά 6V από την εξωτερική τάση τροφοδοσίας. Η μέγιστη θερμοκρασία δεν πρέπει να ξεπερνά τους  $160^\circ\text{C}$ . Εναλλακτικά,

μπορούμε να θερμάνουμε το δείγμα μέχρι τη μέγιστη θερμοκρασία και στη συνέχεια να πάρουμε τις μετρήσεις κατά τη διάρκεια της ψύξης.

Στο πείραμα μετρούμε την τάση του δείγματος γερμανίου στην εκάστοτε θερμοκρασία, έχοντας πάντοτε την ίδια τιμή του ρεύματος  $I$  που τροφοδοτείται από σταθερή πηγή ρεύματος. Υπολογίζουμε την αντίσταση  $R=V/I$  διαιρώντας τις μετρούμενες τιμές της τάσης ( $V_1$  για  $T_1$ ,  $V_2$  για  $T_2, \dots$ ) με την σταθερή τιμή του ρεύματος  $I$ , στην περιοχή θερμοκρασιών από τη θερμοκρασία δωματίου έως τους  $160^\circ\text{C}$ . Στη συνέχεια υπολογίζουμε την ειδική αντίσταση  $\rho$  και την ειδική αγωγιμότητα  $\sigma$  με τη σχέση 1.1, και κάνουμε τον πίνακα 1. Θα παρατηρήσετε ότι η τροφοδοσία του δείγματος με ρεύμα αυξάνει την αρχική του θερμοκρασία έως ότου επέλθει κορεσμός στη θερμοκρασία του δείγματος. Για να αυξήσουμε τη θερμοκρασία του θα πρέπει να αυξάνουμε σταδιακά την εξωτερική AC τάση.

### Πίνακας I

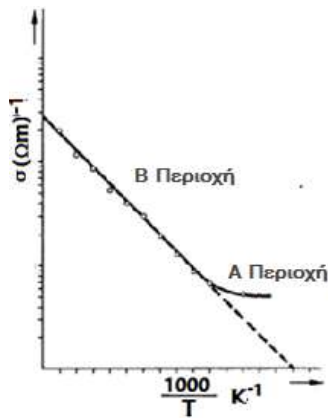
Διαστάσεις Δείγματος:  
Τιμή ρεύματος

$L=20\text{mm}, w=10\text{mm}, d=1\text{mm}$   
 $I=\dots\dots\text{mA}$

$V_{\text{Thermal}} (\mu\text{V}) \times 100$	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
V (Volt)													
$V/I (\Omega)$													
$\rho (\Omega\text{m})$													
$\sigma (\Omega\text{m})^{-1}$													
$\ln \sigma$													
$T_{\text{δείγματος}} (\text{K})$													
$1000/T (\text{K}^{-1})$													

**1.4. Θεωρητικό μέρος.** Το δείγμα είναι καθαρό μονοκρυσταλλικό γερμάνιο. Για το σχηματισμό του κρυστάλλου γερμανίου, κάθε άτομο (έχει σθένος 4) συνδέεται με 4 ομοιοπολικούς δεσμούς με 4 γειτονικά του άτομα. Σε θερμοκρασία του απολύτου μηδενός όλα τα ηλεκτρόνια σθένους είναι δέσμια, επομένως ο κρύσταλλος είναι μονωτής. Όταν θερμαίνεται ο κρύσταλλος, λόγω της θερμικής κίνησης σπάζουν μερικοί δεσμοί. Το **ενεργειακό χάσμα  $E_g$**  είναι η ενέργεια που απαιτείται για το σπάσιμο του ομοιοπολικού δεσμού στον κρύσταλλο. Κάθε δεσμός που σπάζει, ελευθερώνει ένα ηλεκτρόνιο αφήνοντας μία κενή θέση στον αντίστοιχο δεσμό που φέρει ενεργό θετικό φορτίο και ονομάζεται **οπή** (Σχήμα 1.3). Ένα ηλεκτρόνιο από ένα παρακείμενο δεσμό μπορεί να γεμίσει αυτό το κενό και να δημιουργηθεί ένα άλλο κενό σε άλλη θέση κ.ο.ε. Το μετακινούμενο κενό συμπεριφέρεται όπως ένα σωματίδιο με φορτίο  $+q$  λέγεται οπή και κινείται σε αντίθετη κατεύθυνση με το ηλεκτρόνιο παρουσία ηλεκτρικού πεδίου.

Συνεπώς στους **ημιαγωγούς δημιουργούνται δύο σωματίδια ηλεκτρικού φορτίου** ένα ηλεκτρόνιο με αρνητικό φορτίο  $-q=1,602 \times 10^{-19}\text{C}$  και μία οπή με ίσο αλλά θετικό φορτίο  $+q=1,602 \times 10^{-19}\text{C}$  για κάθε δεσμό που σπάζει: Οι οπές συνεισφέρουν στην αγωγιμότητα, η συγκέντρωσή τους  $p$  ( $p$  από τα αρχικά positive φορτίο) είναι ίση με τη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων  $n$  ( $n$  από τα αρχικά negative φορτίο) δηλ.  $n=p=n_i$  και ονομάζεται ενδογενής (intrinsic) συγκέντρωση (αριθμός φορέων ανά μονάδα όγκου). Αν ο κρύσταλλος βρεθεί σε μεγαλύτερη θερμοκρασία, θα σπάσουν περισσότεροι δεσμοί, θα αυξηθεί η συγκέντρωση των φορέων, άρα θα αυξηθεί και η ειδική αγωγιμότητά του  $\sigma$  (εκθετικά) με τη θερμοκρασία. Η ενδογενής αγωγιμότητα παριστάνεται από την περιοχή B στο Σχήμα 1.3.



**Σχήμα 1.3** Γραφική παράσταση  $\ln\sigma(T)$  ως προς  $1000/T$  για τον υπολογισμό του  $E_g$

Το δείγμα είναι εμπλουτισμένο με πρόσμιξη τύπου n ή τύπου p. Στις θερμοκρασίες περιβάλλοντος μπορεί να έχουμε αρχικά **εξωγενή αγωγιμότητα** (περιοχή A στο Σχήμα 1.3) διότι οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος σε ημιαγωγό τύπου n, τα ηλεκτρόνια, προέρχονται από τα πεντασθενή άτομα της πρόσμιξης που όλα έχουν ιονιστεί και έχουν δώσει το πέμπτο ηλεκτρόνιό τους (δότες), ενώ σε ημιαγωγό τύπου p οπές προέρχονται από τα τρισθενή άτομα πρόσμιξης (αποδέκτες). Έτσι η  $\sigma$  δεν εξαρτάται σχεδόν από την θερμοκρασία. Σε υψηλές θερμοκρασίες  $T \gg 300K$  έχουμε την περιοχή B, που είναι η **περιοχή της ενδογενούς αγωγιμότητας** στην οποία τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές ( $n=p$ ) που προκύπτουν από το σπάσιμο των δεσμών μεταξύ των ατόμων γερμανίου υπερτερούν έναντι των ηλεκτρονίων (ή οπών) που προκύπτουν από τα ιονισμένα άτομα των προσμίξεων.

Στην περιοχή θερμοκρασιών όπου κυριαρχεί η ενδογενής ειδική αγωγιμότητα  $\sigma$  του ημιαγωγού, η  $\sigma$  αυξάνει εκθετικά με τη θερμοκρασία και εξαρτάται από το ενεργειακό του χάσμα  $E_g$  σύμφωνα με τη σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{(-E_g/2kT)} \quad (1.3)$$

όπου  $E_g$  είναι το ενεργειακό χάσμα,  $\sigma_0$  είναι μία σταθερά,  $k=8,625 \cdot 10^{-5} \text{eV} \cdot \text{K}^{-1}$  είναι η σταθερά Boltzman και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία (K). Από τη σχέση αυτή, λογαριθμίζοντάς την, μπορούμε να υπολογίσουμε το ενεργειακό χάσμα των ημιαγωγών από την κλίση  $b$  του ευθύγραμμου τμήματος στο διάγραμμα  $\ln \sigma$  ως προς  $T^{-1}$

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2k} \cdot \frac{1}{T} \quad (1.4)$$

$$\text{όπου } b = -\frac{E_g}{2k} \Rightarrow E_g = -b \cdot 2k \quad (1.5)$$

Η σχέση 1.4 είναι μία γραμμική εξίσωση του τύπου  $y=ax+b$ , όπου  $y=\ln\sigma$ ,  $x=1/T$  και  $b = -\frac{E_g}{2k}$  είναι η κλίση της ευθείας, που είναι αρνητική (οπότε η τιμή του  $E_g$  είναι θετική).

Από το διάγραμμα  $I_{ps-1000/T}$  (Σχήμα 1.3) που προκύπτει από τις μετρήσεις του πίνακα  $I$ , επιλέγουμε την ενδογενή περιοχή θερμοκρασιών, όπου η γραφική παράσταση είναι ευθεία γραμμή όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.3, και από την κλίση της ευθείας του διαγράμματος, σύμφωνα με τη σχέση (1.5), υπολογίζουμε το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Να γίνει σύγκριση της πειραματικής σας τιμής του  $E_g$  μ' αυτή της βιβλιογραφίας.

**Μετρήσεις σε δείγμα ενσωματωμένο στην πλακέτα τύπου 2** που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα. Η τροφοδοσία με ρεύμα του δείγματος γίνεται συνδέοντας απευθείας την έξοδο της γεννήτριας σταθερού ρεύματος στους σηματολήπτες ρεύματος του δείγματος από την πίσω πλευρά της πλακέτας. Οι μονάδες μέτρησης θερμοκρασίας και ρεύματος είναι ενσωματωμένες μέσα στο μαύρο πλαίσιο (δεν φαίνονται). Το ρεύμα και η θερμοκρασία εμφανίζονται σε μία ενσωματωμένη ψηφιακή οθόνη που βρίσκεται στην μπροστινή πλευρά του πλαισίου που περιέχει την πλακέτα του δείγματος.



**1.5 Στην εργασία σας** να δώσετε τον πίνακα  $I$  με τις μετρήσεις σας. Γιατί καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του δείγματος ελαττώνεται η μετρούμενη τάση; Να κάνετε τη γραφική παράσταση της αντίστασης  $R(T)$ , της ειδικής αντίστασης  $\rho(T)$  σε συνάρτηση με τη μετρούμενη θερμοκρασία (χρήση Excel ή Matlab). Να εξηγήσετε ποιοτικά τη μεταβολή του  $\rho$  με τη θερμοκρασία. Να δώσετε και να σχολιάσετε τις αντίστοιχες (ποιοτικές) καμπύλες  $R(T)$  και  $\rho(T)$  για τα μέταλλα, εξηγώντας τους λόγους της διαφορετικής συμπεριφοράς. Να αναλύσετε τον τρόπο υπολογισμού του ενεργειακού χάσματος. Είναι το  $E_g(0)$ ; Να γίνει σύγκριση της πειραματικής σας τιμής του  $E_g$  μ' αυτή της βιβλιογραφίας. Να αναφέρετε κάποια πειραματικά σφάλματα στις μετρήσεις σας στα οποία μπορεί να οφείλεται η τυχόν απόκλιση που θα βρείτε. Να αναφέρετε την αρχή λειτουργίας του θερμοζεύγους (αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας)

### **ΠΡΟΑΙΡΕΤΙΚΑ!!**

**Να απαντηθούν οι παρακάτω ερωτήσεις σχετικές με το πείραμα**

1. Γιατί χρησιμοποιούμε σταθερή πηγή ρεύματος και όχι σταθερή πηγή τάσης για την τροφοδοσία του δείγματος;
2. Πώς επηρεάζουν οι παράγοντες, ρεύμα και θερμοκρασία τις μετρήσεις;

3. Γιατί η τροφοδοσία του δείγματος με ρεύμα αυξάνει την αρχική του θερμοκρασία έως ότου επέλθει κορεσμός στη θερμοκρασία του δείγματος;

**Για τη κατανόηση του πειράματος** σε βάθος, είναι απαραίτητο να μελετήσετε τη σχετική θεωρία που αναπτύσσεται στο θεωρητικό μέρος του πειράματος.

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΑΣΚΗΣΗ II ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ HALL

Μετρήσεις του τύπου του ηλεκτρικού φορτίου, της συγκέντρωσης και της ευκινησίας των φορέων σε ημιαγωγούς

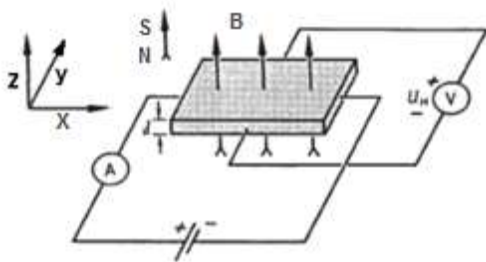
### 2.1 Βασικές έννοιες

Ημιαγωγός, μονοκρυσταλλικό υλικό, φορείς ηλεκτρικού φορτίου (αρνητικό φορτίο: ηλεκτρόνιο, θετικό φορτίο: οπή), εμπλουτισμένοι ημιαγωγοί με προσμίξεις τύπου n, εμπλουτισμένοι ημιαγωγοί με προσμίξεις τύπου p, εξωγενής αγωγιμότητα, συγκέντρωση φορέων και ευκινησία (κινητικότητα). Φαινόμενο Hall, δύναμη Lorentz.

### 2.2 Αρχή -εργασία πειράματος

Ο τύπος του ηλεκτρικού φορτίου, η συγκέντρωση και η ευκινησία του φορέα του ηλεκτρικού ρεύματος (ηλεκτρόνιο ή οπή) προσδιορίζονται από μετρήσεις της τάσης Hall σε συνάρτηση με το μαγνητικό πεδίο και της αντίστασης σε δείγματα ημιαγωγών από πλακίδια γερμανίου με προσμίξεις (τύπου π ή τύπου p) ορθογωνίου Σχήματος.

Όταν ένας ημιαγωγός σε μορφή ορθογώνιου που διαρρέεται από ρεύμα βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο το οποίο είναι κάθετο στο ρεύμα, οι φορείς του ηλεκτρικού φορτίου στο υλικό (ηλεκτρόνια ή οπές) εκτρέπονται από την αρχική τους πορεία λόγω της δύναμης Lorentz (που εξαρτάται από το πρόσημο του φορτίου του φορέα και την ταχύτητά του), δημιουργούν ένα εγκάρσιο ηλεκτρικό πεδίο, το πεδίο του Hall το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση της τάσης Hall. Αν η πυκνότητα ρεύματος είναι στη διεύθυνση +x, J, και το μαγνητικό πεδίο στη διεύθυνση +z, B, τότε το πεδίο του Hall,  $E_H$ , θα έχει φορά είτε προς το -y είτε προς το +y, ανάλογα με την πολικότητα του φορτίου (ηλεκτρόνιο ή οπή, αντίστοιχα, βλέπε Σχήμα 2.1). Αυτό, γιατί στους ημιαγωγούς τα ηλεκτρόνια και οι οπές κινούνται σε αντίθετη διεύθυνση οπότε αμφότεροι εκτρέπονται στην ίδια διεύθυνση. Αν γνωρίζουμε τη διεύθυνση του ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου, το πρόσημο της τάσης Hall δηλώνει εάν το ρεύμα του δείγματος κυριαρχείται από την κίνηση (ονομάζεται ολίσθηση) αρνητικού φορτίου ή την ολίσθηση θετικού φορτίου.



Σχήμα 2.1. Απεικόνιση του φαινομένου Hall σε δείγμα ορθογωνίου Σχήματος. Η πολικότητα της τάσης Hall,  $V_H$  στο Σχήμα αντιστοιχεί σε φορείς του ρεύματος με αρνητικό φορτίο (ηλεκτρόνια).

Η τάση Hall,  $V_H$ , εξαρτάται από το είδος του υλικού προς μέτρηση και είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος  $I$  και του μαγνητικού πεδίου  $B$ , αντιστρόφως δε ανάλογη του πάχους  $d$  του πλακιδίου (στη διεύθυνση  $z$ ) και δίνεται από τη σχέση:

$$V_H = R_H \frac{I \cdot B}{d} \Rightarrow R_H = \frac{V_H \cdot d}{B \cdot I} \quad (2.1)$$

όπου η σταθερά αναλογίας  $R_H$ , είναι ο συντελεστής Hall, χαρακτηριστική σταθερά του υλικού. Η συγκέντρωση  $n$ (ή  $p$ ) των ηλεκτρονίων(ή οπών) καθώς και η ευκινησία τους  $\mu$  και η ειδική αγωγιμότητα  $\sigma$  του ημιαγωγού, συνδέονται με τις παρακάτω σχέσεις:

$$n = -\frac{1}{q \cdot R_H}, \quad p = +\frac{1}{q \cdot R_H} \quad \text{και} \quad \mu_H = \frac{R_H}{\rho} = R_H \cdot \sigma \quad (2.2)$$

Η ταχύτητα κίνησης των φορέων σε απόκριση ενός εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου  $E$  (η κίνηση ονομάζεται ολίσθηση) είναι ανάλογη με το  $E$  (V/cm) και η σταθερά αναλογίας λέγεται ευκινησία ή κινητικότητα (mobility):

$$v_n = -\mu_n \cdot E \quad \text{και} \quad v_p = \mu_p \cdot E \quad (2.3)$$

όπου  $v_n$  και  $v_p$  είναι οι ταχύτητες ολίσθησης των ηλεκτρονίων και οπών, αντίστοιχα και  $\mu_n, \mu_p$  (σε  $m^2 V^{-1} sec^{-1}$ ) είναι οι ευκινησίες τους.

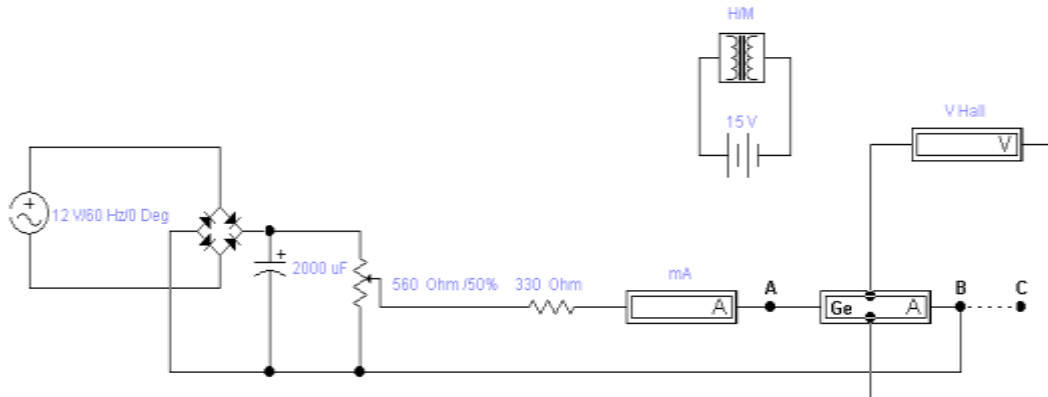
### 2.3 Περιγραφή οργάνων

**α) Δείγματα.** Τα δείγματα, πλακίδια γερμανίου Σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου εμπλουτισμένα με προσμίξεις (ένα **n**- και ένα **p**-τύπου), είναι τοποθετημένα πάνω σε ειδικές πλακέτες. Οι διαστάσεις των δειγμάτων είναι:  $l=20mm$ ,  $w=10mm$  και  $d=1mm$ . Στα άκρα των ημιαγωγικών πλακιδίων είναι κατασκευασμένες μεταλλικές επαφές από αλουμίνιο για την παροχή του ρεύματος κατά μήκος του δείγματος, και τη μέτρηση της τάσης Hall κατά πλάτος.

**β) Παροχή σταθερού ρεύματος.** Το ρεύμα παρέχεται στο δείγμα με ένα τροφοδοτικό ισχύος (από την AC τάση στην έξοδο του τροφοδοτικού με τη βοήθεια γέφυρας ανόρθωσης και ενός ηλεκτρολυτικού πυκνωτή που συνδέεται στην έξοδο του ανορθωτή) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2 και το μετράμε με ένα πολύμετρο. Ελέγχουμε την ένταση του ρεύματος με τη βοήθεια ενός ποτενσιόμετρου των  $560\Omega$ . Για την προστασία του δείγματος (δεν πρέπει να ξεπεράσουμε τα  $50mA$ ) συνδέουμε μία αντίσταση των  $330\Omega$  σε σειρά για τον περιορισμό του ρεύματος στο δείγμα.



γ) Ηλεκτρομαγνήτης. Το μαγνητικό πεδίο παράγεται από δύο σε σειρά συνδεδεμένα πηνία που τροφοδοτούνται από μία πηγή συνεχούς τάσης. Για να πάρετε το επιθυμητό μαγνητικό πεδίο, θέστε τη μέγιστη τιμή της τάσης και ρυθμίστε το ρεύμα με το κουμπί ελέγχου του ρεύματος στο τροφοδοτικό ισχύος. Με αυτόν τον τρόπο η μονάδα του τροφοδοτικού λειτουργεί σαν πηγή σταθερού ρεύματος και έτσι η ένταση του πεδίου δεν επηρεάζεται από αλλαγές στην αντίσταση που προκαλούνται από μεταβολές στη θερμοκρασία. Ένας αισθητήρας που βρίσκεται στο κέντρο ανάμεσα στους πόλους του ηλεκτρομαγνήτη (που είναι ένα probe Hall) μεταφέρει την τιμή του πεδίου στη ψηφιακή ένδειξη ενός Teslameter (όργανο μέτρησης έντασης μαγνητικού πεδίου).



**Σχήμα 2.2** Διαγραμματική παράσταση του κυκλώματος μέτρησης της τάσης Hall για πλακίδια γερμανίου Σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου.

δ) Μέτρηση της τάσης Hall. Την τάση Hall (μερικά mV) την μετράμε με ένα πολύμετρο υψηλής αντίστασης. Το όργανο αυτό δείχνει και την πολικότητα της τάσης.

#### 2.4 Διαδικασία πειράματος

Πάρτε ένα από τα δείγματα και με τη βοήθεια του κυκλώματος μέτρησης της τάσης Hall που φαίνεται στο Σχήμα 2.2, μετρήστε την τάση Hall για μία μεγάλη περιοχή ρεύματος που διαρρέει το δείγμα (σύνδεση της παροχής ρεύματος με τους σηματολήπτες A και B) καθώς και την ένταση του ρεύματος για δεδομένο μαγνητικό πεδίο. Φροντίστε να καταγράφετε πάντοτε τη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, το πρόσημο του ρεύματος και της τάσης του Hall. Σημειώστε ότι η τάση μεταξύ των σηματοληπτών Hall δεν είναι μηδέν και όταν ακόμη το δείγμα είναι έξω από το μαγνητικό πεδίο γιατί οι επαφές Hall δεν βρίσκονται ακριβώς στην ίδια ισοδυναμική επιφάνεια. Η τάση του Hall είναι η αλγεβρική μεταβολή της μετρούμενης τάσης όταν το δείγμα βρίσκεται μέσα στο μαγνητικό πεδίο π.χ. αν η τάση είναι +1mV όταν το δείγμα βρίσκεται έξω από το μαγνητικό πεδίο και μέσα είναι -3mV, τότε η τάση Hall είναι -3-1= -4mV. Η τάση Hall γενικά μπορεί να μετρηθεί κάνοντας δύο επαφές τη μία ακριβώς απέναντι στην άλλη στο δείγμα. Πρακτικά είναι αδύνατο να κατασκευάσουμε επαφές ακριβώς τη μία απέναντι στην άλλη γι' αυτό και εμφανίζεται μία τάση μεταξύ τους που οφείλεται στην ειδική αντίσταση του υλικού ακόμα και όταν δεν υπάρχει μαγνητικό πεδίο.

Για να απαλείψουμε από τη μέτρηση της τάσης Hall αυτή την ανεπιθύμητη τάση, χρησιμοποιούμε μία διάταξη με ένα ποτενσιόμετρο η οποία είναι ενσωματωμένη πάνω στην πλακέτα και συνδέεται με την επαφή C. Αυτό γίνεται, ρυθμίζοντας το ποτενσιόμετρο έτσι ώστε σε μηδενικό μαγνητικό πεδίο να μην εμφανίζεται καμία τάση στο βολτόμετρο, ακόμη και όταν το δείγμα διαρρέεται από ρεύμα.

Για να μετρήσουμε την αντίσταση του δείγματος, μετράμε την τάση μεταξύ των σηματοληπτών A και B με μηδενικό μαγνητικό πεδίο.

## 2.5 Μετρήσεις και επεξεργασία δεδομένων

**1<sup>η</sup> μέτρηση με μαγνητικό πεδίο:** Για μία σταθερή τιμή του μαγνητικού πεδίου B, μεταβάλλουμε το ρεύμα I, που διαρρέει κατά μήκος του πλακιδίου(μεταξύ των σηματοληπτών A και B) και μετράμε την τάση Hall  $V_H$ , κατά πλάτος του πλακιδίου. Τα αποτελέσματα τα σημειώνουμε στον πίνακα II.

**2<sup>η</sup> μέτρηση με μαγνητικό πεδίο:** Μεταφέρουμε τον ακροδέκτη (καλώδιο) από τη θέση B στη θέση C. Για μία σταθερή τιμή του ρεύματος I μεταβάλλουμε το μαγνητικό πεδίο B, και μετράμε πάλι την τάση Hall,  $V_H$ . Τα αποτελέσματα τα σημειώνουμε στον πίνακα III.

Πίνακας II

### 1<sup>η</sup> Μέτρηση

με σταθερό το μαγνητικό πεδίο

B = .....mT	
I [mA]	$V_H$ [mV]
2	
5	
10	
15	
20	
25	
30	
35	
40	

Πίνακας III

### 2<sup>η</sup> Μέτρηση

με σταθερό το ρεύμα

I = .....mA	
B [mT]	$V_H$ [mV]
20	
40	
60	
80	
100	
130	
160	
190	
220	

Από το πρόσημο της τάσης Hall βρίσκουμε τον τύπο αγωγιμότητας. Στο διάγραμμα  $V_H - I$  των μετρήσεων του πίνακα II θα πρέπει να πάρουμε μία ευθεία γραμμή (βλέπε Σχήμα 2.3 α) όπως αναμένουμε, δηλαδή θα πρέπει να υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης Hall  $V_H$  και του ρεύματος I (σχέση 1.1) και από την κλίση της ευθείας υπολογίζουμε το συντελεστή Hall.

$V_H = a \cdot I$  όπου a είναι η κλίση της ευθείας γραμμής

$$\text{οπότε } R_{\text{H}} = \frac{V_H}{I} \cdot \frac{d}{B} = a \cdot \frac{d}{B}$$

Στο Σχήμα 2.3 β απεικονίζεται η γραφική παράσταση του  $V_H - B$  των μετρήσεων του πίνακα III, όπου και εδώ υπάρχει γραμμική σχέση μεταξύ της τάσης Hall  $V_H$  και του μαγνητικού πεδίου B. Από την κλίση της ευθείας στο διάγραμμα  $V_H - B$  υπολογίζουμε το συντελεστή Hall  $R_{\text{H}}$ .

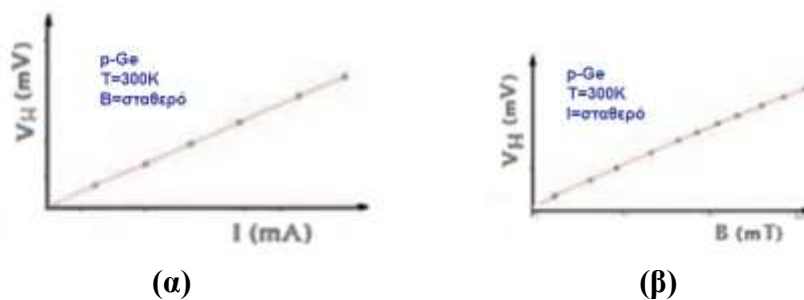
$V_H = b \cdot B$  όπου b είναι η κλίση της ευθείας γραμμής

$$\text{οπότε } R_{\text{H}} = \frac{V_H}{B} \cdot \frac{d}{I} = b \cdot \frac{d}{I}$$

Κατόπιν από τις σχέσεις 2.2 υπολογίζουμε τη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στον ημιαγωγό τύπου n (ή οπών σε ημιαγωγό τύπου p). Από τον συντελεστή Hall και την ειδική αντίσταση υπολογίζουμε την ευκινησία Hall,  $\mu$ , καθώς και τη σταθερά διάχυσης  $D$ , των φορέων του ηλεκτρικού ρεύματος. Σε κάθε υπολογιζόμενο μέγεθος πρέπει να γράφετε και τις φυσικές μονάδες.

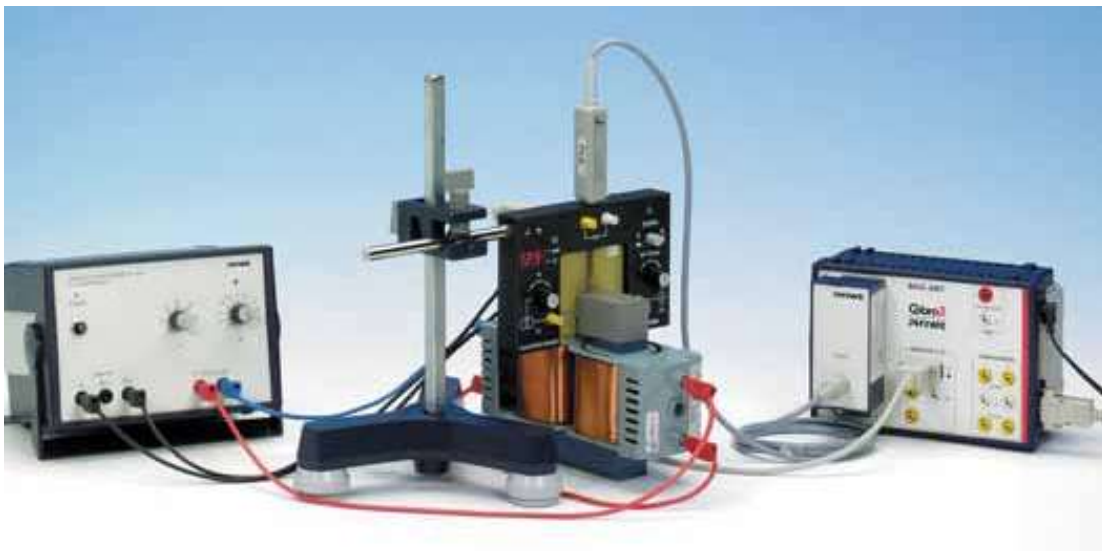
$$D = \frac{kT}{q} \cdot \mu \quad (\text{m sec}^{-1}) \quad (2.4)$$

Γιατί προτιμήσαμε μετρήσεις του φαινομένου Hall σε ημιαγωγούς αντί σε μέταλλα



**Σχήμα 2.3** Απεικόνιση των γραφικών παραστάσεων: α)  $V_H - I$  και β)  $V_H - B$  σε θερμοκρασία 300K ενός δείγματος p-τύπου.

Στην πλακέτα τύπου 2 που φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα το ρεύμα και η τάση Hall εμφανίζονται σε μία ενσωματωμένη ψηφιακή οθόνη που βρίσκεται στην μονάδα που περιέχει την πλακέτα του δείγματος.



**Σχήμα 2.4** Απεικόνιση της πλακέτας τύπου 2 όπου είναι ενσωματωμένο το προς μέτρηση δείγμα, ο εξοπλισμός με τα όργανα μέτρησης και οι διασυνδέσεις.

**1.6 Στην εργασία σας** να δώσετε τον πίνακα I με τις μετρήσεις σας. Γιατί καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του δείγματος ελαττώνεται η μετρούμενη τάση;

Να κάνετε τη γραφική παράσταση της αντίστασης  $R(T)$ , της ειδικής αντίστασης  $\rho(T)$  σε συνάρτηση με τη μετρούμενη θερμοκρασία (χρήση Excel ή Matlab). Να εξηγήσετε ποιοτικά τη μεταβολή του  $\rho$  με τη θερμοκρασία

Να δώσετε και να σχολιάσετε τις αντίστοιχες (ποιοτικές) καμπύλες  $R(T)$  και  $\rho(T)$  για τα μέταλλα, εξηγώντας τους λόγους της διαφορετικής συμπεριφοράς.

Να αναλύσετε τον τρόπο υπολογισμού του ενεργειακού χάσματος. Είναι το  $E_g(0)$ ;

Να γίνει σύγκριση της πειραματικής σας τιμής του  $E_g$  μ' αυτή της βιβλιογραφίας.

Να αναφέρετε κάποια πειραματικά σφάλματα στις μετρήσεις σας στα οποία μπορεί να οφείλεται η τυχόν απόκλιση που θα βρείτε.

Να αναφέρετε την αρχή λειτουργίας του θερμοζεύγους (αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας)

## **ΠΡΟΑΙΡΕΤΙΚΑ !!**

**Να απαντηθούν οι παρακάτω ερωτήσεις σχετικές με το πείραμα**

1. Γιατί χρησιμοποιούμε σταθερή πηγή ρεύματος και όχι σταθερή πηγή τάσης για την τροφοδοσία του δείγματος;
2. Πώς επηρεάζουν οι παράγοντες, ρεύμα και θερμοκρασία τις μετρήσεις;
3. Γιατί η τροφοδοσία του δείγματος με ρεύμα αυξάνει την αρχική του θερμοκρασία έως ότου επέλθει κορεσμός στη θερμοκρασία του δείγματος;

## **Βιβλιογραφία**

Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Τεχνολογία Ηλεκτροτεχνικών και Ηλεκτρονικών Υλικών, Δ. Γκιργκινούδη, έκδοση Δ.Π.Θ.

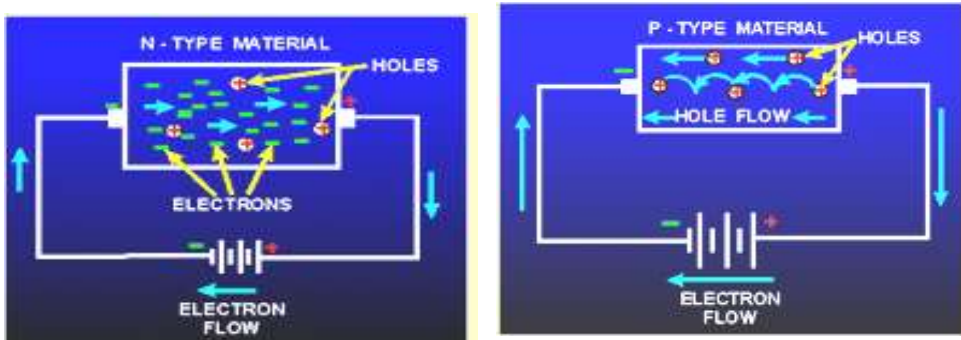
[Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και Διατάξεων, S. O. Kasap, Τέταρτη έκδοση, Αθήνα 2007.](#)

**Εμπλουτισμένοι ημιαγωγοί με προσμίξεις (ονομάζονται και εξωγενείς).** Η εισαγωγή προσμίξεων π.χ. άτομα φωσφόρου με σθένος 5 είτε άτομα βορίου με σθένος 3 στους καθαρούς ημιαγωγούς π.χ. γερμάνιο ή πυρίτιο με σθένος 4, μειώνει την ειδική αντίστασή τους, και μπορεί να μεταβάλλεται κατά πολλές τάξεις μεγέθους ανάλογα με τη συγκέντρωση των προσμίξεων. Στο πείραμα αυτό μπορούμε να καθορίσουμε εάν η ειδική αντίσταση του υλικού ελέγχεται από ηλεκτρόνια ή οπές.

Για να αυξηθεί ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων στα πλακίδια από καθαρό γερμάνιο προστίθενται πεντασθενή άτομα π.χ. φωσφόρος, αρσενικό. Τα ηλεκτρόνια σθένους της πεντασθενούς πρόσμιξης συμπληρώνουν τους 4 ομοιοπολικούς δεσμούς με 4 γειτονικά τους άτομα γερμανίου, ενώ το πέμπτο ηλεκτρόνιό τους επειδή είναι ασύζευκτο ελευθερώνεται πολύ εύκολα. Κάθε άτομο πρόσμιξης που χάνει το ηλεκτρόνιό του γίνεται θετικό ιόν και ταυτόχρονα στον κρύσταλλο δίνει ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο (λέγονται δότες, επειδή δίνουν ηλεκτρόνια). Ο κρύσταλλος ηλεκτρικά είναι ουδέτερος. Σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, επειδή η θερμική ενέργεια είναι αρκετή όλα τα άτομα φωσφόρου ελευθερώνουν το πέμπτο ηλεκτρόνιό τους, η συγκέντρωση αυτών των ηλεκτρονίων (εξωγενής συγκέντρωση) είναι πολύ μεγαλύτερη από την ενδογενή συγκέντρωση των οπών που προέρχονται από το σπάσιμο των δεσμών μεταξύ των ατόμων γερμανίου, οπότε έχουμε περίσσεια αρνητικού φορτίου (δηλ.  $n > p$ ). Στο ρεύμα κυριαρχεί το ρεύμα που οφείλεται στην κίνηση των ηλεκτρονίων (Σχήμα 2.5α). Οι ημιαγωγοί αυτοί λέγονται **τύπου n** (n από τα αρχικά negative φορτίο).

Για να αυξηθεί ο αριθμός των οπών προστίθενται άτομα με σθένος 3 π.χ. άτομα βορίου, γαλλίου στον καθαρό κρύσταλλο γερμανίου (ή πυριτίου). Τα 3 ηλεκτρόνια

σθένους συμπληρώνουν μόνο 3 από τους 4 ομοιοπολικούς δεσμούς με 4 γειτονικά τους άτομα γερμανίου, οπότε σε έναν από τους 4 δεσμούς υπάρχει κενό που μπορεί με πολύ μικρή ενέργεια να δεχτεί ένα ηλεκτρόνιο(για αυτό λέγεται αποδέκτης). Έτσι γίνεται αρνητικό ιόν και ταυτόχρονα δημιουργείται μια θετική οπή στη θέση του κρυστάλλου από την οποία έφυγε το ηλεκτρόνιο. Ο κρύσταλλος ηλεκτρικά είναι ουδέτερος. Η συγκέντρωση των οπών  $p$  (εξωγενής) είναι πολύ μεγαλύτερη από την ενδογενή συγκέντρωση των ηλεκτρονίων  $n$  που προέρχονται από το σπάσιμο των ομοιοπολικών δεσμών μεταξύ των ατόμων γερμανίου (δηλ.  $p > n$ ). Στο ρεύμα κυριαρχεί το ρεύμα που οφείλεται στην κίνηση των οπών (Σχήμα 2.5β). Οι ημιαγωγοί αυτοί λέγονται **τύπου p** (από τα αρχικά positive φορτίο).



(α)

(β)

**Σχήμα 2.5** Απεικόνιση της κίνησης των (α) ηλεκτρονίων σε n-τύπου ημιαγωγό και (β) των οπών σε p-τύπου ημιαγωγό παρουσία ηλεκτρικού πεδίου.

**Για τη κατανόηση του πειράματος** σε βάθος είναι απαραίτητο να μελετήσετε τη σχετική θεωρία που αναπτύσσεται στην πειραματική άσκηση.