

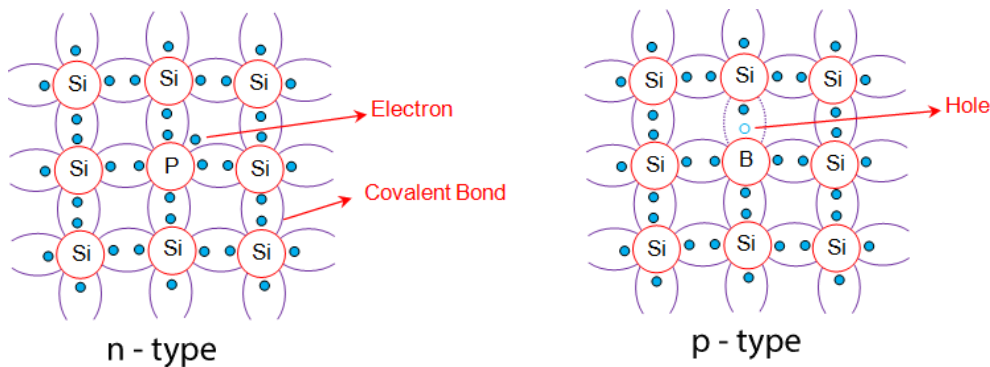
## Εργαστηριακή άσκηση Φαινόμενο Hall

Σκοπός της άσκησης είναι ο πειραματικός προσδιορισμός των μεγεθών της σταθεράς Hall, της συγκέντρωση φορέων της αγωγιμότητας και της ευκινησίας ενός ημιαγωγού Ge.

### Φυσικές έννοιες

Οι ημιαγωγοί προσμείξεων διακρίνονται σε ημιαγωγούς τύπου n (negative) και τύπου p (positive). Οι ημιαγωγοί τύπου n προκύπτουν όταν ένα πεντασθενές στοιχείο εισαχθεί σε έναν ενδογενή ημιαγωγό, όπως το Si ή το Ge. Το στοιχείο αυτό δημιουργεί τέσσερις δεσμούς με τα γειτονικά άτομα και περισεύει ένα ηλεκτρόνιο το οποίο συμβάλει στην αγωγιμότητα (σχήμα 1α).

Οι ημιαγωγοί τύπου p προκύπτουν όταν ένα τρισθενές στοιχείο εισαχθεί στον ενδογενή ημιαγωγό (σχήμα 1β). Στην περίπτωση αυτή σχηματίζονται τρεις δεσμοί με τα γειτονικά άτομα Si ή Ge ενώ υπάρχει και μια κενή θέση, η οπή, από το δεσμό που λείπει. Στη θέση αυτή μπορεί να μεταπηδήσει ένα ηλεκτρόνιο από ένα άλλο άτομο και να παγιδευτεί με αποτέλεσμα η οπή να μετακινείται στο χώρο του πλέγματος και να συνεισφέρει στην αγωγιμότητα. Οι οπές συμπεριφέρονται ως σωματίδια που έχουν θετικό φορτίο.



Σχήμα 1 (α) ημιαγωγός τύπου n και (β) ημιαγωγός τύπου p

### Αντίσταση, αγωγιμότητα και πυκνότητα ρεύματος

Η αγωγιμότητα είναι ένα φυσικό μέγεθος το οποίο περιγράφει την ικανότητα ενός υλικού να επιτρέπει τη μετακίνηση φορέων φορτίου μέσα από τον όγκο του. Κατά συνέπεια είναι μια ιδιότητα που χαρακτηρίζει το κάθε υλικό. Η αγωγιμότητα  $\sigma$  συνδέεται με την πυκνότητα των φορέων φορτίου (πχ ηλεκτρονίων)  $n$  και με το πόσο εύκολα μπορούν να μετακινηθούν αυτά μέσα σε ένα υλικό,  $\mu$ , δηλαδή την ευκινησία. Συγκεκριμένα ισχύει

$$\sigma = ne\mu$$

Όπου  $e$  είναι το απόλυτο στοιχειώδες φορτίο.

Η αντίσταση είναι ένα μέγεθος το οποίο εξαρτάται από το είδος του υλικού, δηλαδή την αγωγιμότητά του,  $\sigma$ , αλλά και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού, το μήκος  $l$  και την επιφάνεια διατομής  $A$ , δηλαδή

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{A}$$

Τη μεταφορά φορέων φορτίου μέσα από τον όγκο ενός υλικού την περιγράφουμε **μακροσκοπικά** με το φυσικό μέγεθος της πυκνότητας ρεύματος, δηλαδή του ρεύματος ανά μονάδα επιφάνειας

$$J = \frac{I}{A}$$

Η πυκνότητα ρεύματος όμως εκ των πραγμάτων συνδέεται με τη μετακίνηση φορέων φορτίου (ηλεκτρόνια, σπές, ιόντα κλπ), σωμάτια τα οποία έχουν μικροσκοπική υπόσταση. Κατά συνέπεια η πυκνότητα ρεύματος θα πρέπει να μπορεί να εκφραστεί και σε συνάρτηση με μεγέθη που περιγράφουν τον μικρόκοσμο. Πράγματι η πυκνότητα ρεύματος συνδέεται με τον ατομικό κόσμο μέσα από την πολύ απλή σχέση

$$J = (-e) \cdot n \cdot u$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει για τα ηλεκτρόνια, γι' αυτό και το φορτίο έχει το αρνητικό πρόσημο,  $n$  είναι η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων (ηλεκτρόνια ανά μονάδα όγκου) και  $u$  είναι η μέση ταχύτητα με την οποία κινούνται τα ηλεκτρόνια.

Σαφώς, αντίστοιχες σχέσεις θα ισχύουν και για οποιοδήποτε άλλο είδος φορέα φορτίου.

## Το φαινόμενο Hall

Αν σε έναν αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα εφαρμοστεί ένα μαγνητικό πεδίο κάθετα στην κατεύθυνση του ρεύματος όπως φαίνεται στο σχήμα 2α, οι κινούμενοι φορείς φορτίου (στην προκειμένη περίπτωση ηλεκτρόνια) δέχονται δύναμη Lorentz. Με αυτό τον τρόπο συσσωρεύονται φορτία στις πλευρές του ημιαγωγού (σχήμα 2β) και εμφανίζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο Hall,  $E_H$  σχήμα 2γ. Εξαιτίας του πεδίου Hall εμφανίζεται μια δύναμη στα κινούμενα φορτία η οποία αντισταθμίζεται στη δύναμη Lorentz με αποτέλεσμα να εξισωθούν οι δύο δυνάμεις, σχήμα 2δ.

Ο αγωγός διαρρέεται από ρεύμα πυκνότητας

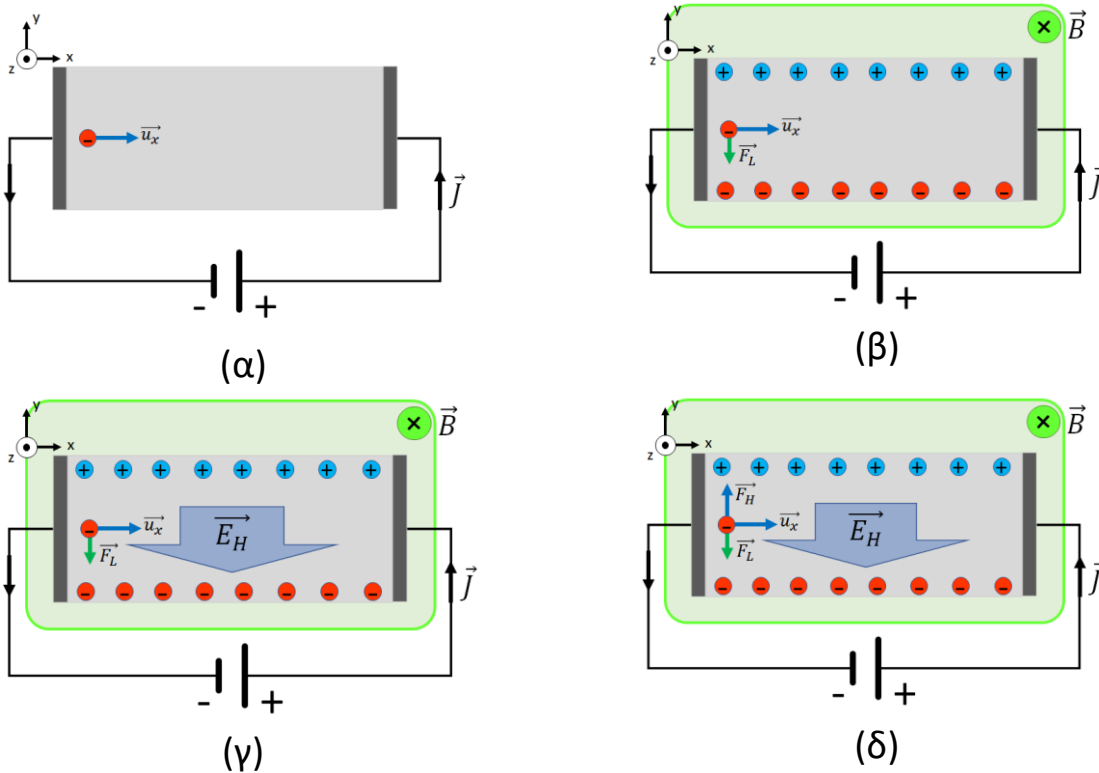
$$\vec{J} = (-e) \cdot n \cdot u \cdot \hat{x}$$

Όπου  $n$  είναι ο αριθμός φορέων φορτίου (ηλεκτρονίων) ανά μονάδα όγκου. Εξαιτίας του μαγνητικού πεδίου εμφανίζεται δύναμη Lorentz που περιγράφεται από τη σχέση

$$\vec{F}_m = -e \cdot \vec{u}_d \times \vec{B} = e \cdot u_x \cdot B(-\hat{y})$$

Καθώς συσσωρεύονται αρνητικά φορτία στη μια πλευρά του αγωγού και αρνητικά στην άλλη πλευρά δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο  $E_H$  (Hall) το οποίο ασκεί δύναμη

$$\vec{F}_H = e\vec{E}_H$$



Σχήμα 2. Εμφάνιση του φαινομένου Hall

Η δύναμη Hall αυξάνεται όσο συσσωρεύονται τα φορτία ώσπου να εξισωθούν οι δυνάμεις Lorentz και Hall οπότε

$$\vec{F}_H = -\vec{F}_m \Rightarrow eE_H = eu_x B \Rightarrow E_H = -\frac{1}{en} JB \Rightarrow \frac{V_H}{w} = -\frac{1}{en} \frac{I}{wd} B$$

$$V_H = -\frac{1}{en} \frac{IB}{d}$$

Η τάση Hall αλλάζει γραμμικά με το ρεύμα αν το μαγνητικό πεδίο είναι σταθερό ή με το μαγνητικό πεδίο αν το ρεύμα είναι σταθερό δηλαδή

$$y = ax \text{ με } \alpha = \frac{R_H B}{d} \text{ ή } \alpha = \frac{R_H I}{d}$$

Η σταθερά  $R_H$  ονομάζεται συντελεστής Hall και από αυτόν μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση των φορέων (συγκέντρωση ηλεκτρονίων στην προκειμένη περίπτωση) αφού

$$R_H = -\frac{1}{en}$$

Η ίδια σχέση ισχύει και για έναν ημιαγωγό τύπου  $n$ , ενώ για έναν ημιαγωγό τύπου  $p$  η σταθερά Hall θα είναι

$$R_H = +\frac{1}{ep}$$

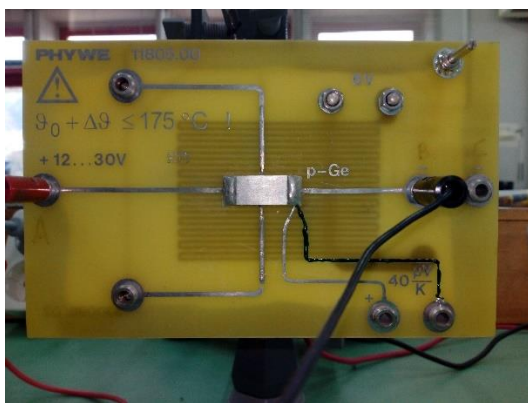
Όπου  $p$  είναι η συγκέντρωση θετικών φορέων φορτίου (οπές) ανά μονάδα όγκου.

Τα μεγέθη  $n$  και  $p$  παριστάνουν την ίδια φυσική ποσότητα (συγκέντρωση φορέων) αλλά χρησιμοποιούμε διαφορετικό συμβολισμό για να μπορούμε να διαχωρίζουμε τους δύο μηχανισμούς αγωγιμότητας σε υλικά που υπάρχουν και τα δύο είδη φορέων.

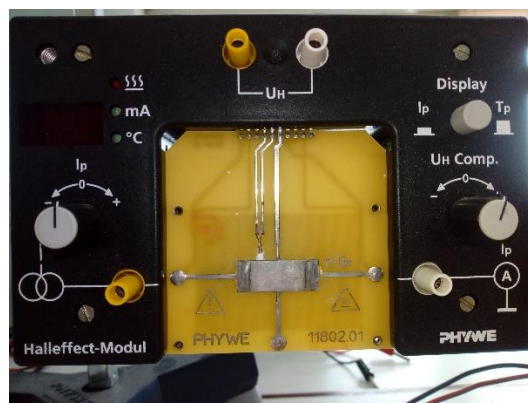
### Πειραματικές διατάξεις

**Δείγματα:** Τα δείγματα, πλακίδια γερμανίου σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου εμπλουτισμένα με προσμίξεις (n-τύπου ή p-τύπου), είναι τοποθετημένα πάνω σε ειδικές πλακέτες όπως φαίνεται στο σχήμα 3. Οι διαστάσεις των δειγμάτων είναι:  $L=20\text{mm}$ ,  $w=10\text{mm}$ , και  $d=1\text{mm}$ . 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.

**Διάταξη:** Η κυκλωματική απεικόνιση του πειράματος Hall φαίνεται στο σχήμα 4(α). Στο σχήμα 4(β) φαίνεται η πειραματική διάταξη για την πλακέτα τύπου 1 και στο σχήμα 4(γ) η πειραματική διάταξη για την πλακέτα τύπου 2.

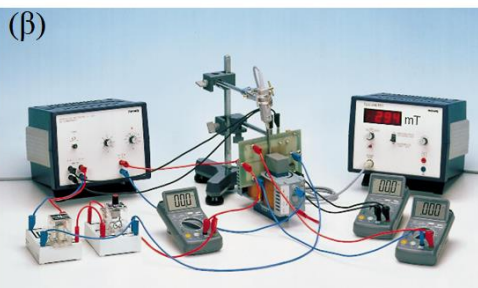
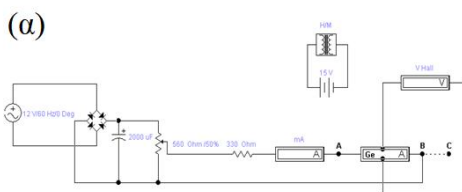


(α)

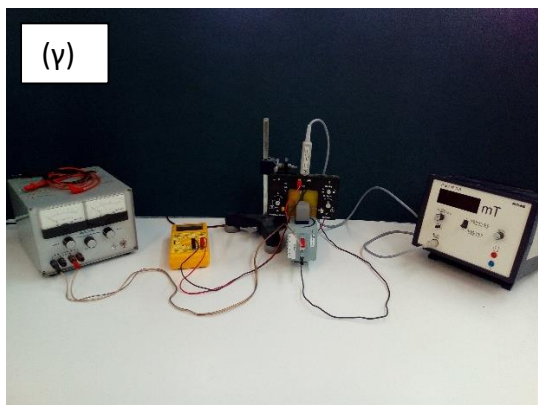


(β)

Σχήμα 3. Πλακέτα γερμανίου (α) τύπου 1 και (β) τύπου 2



(β)



(γ)

Σχήμα 4. (α) Η κυκλωματική απεικόνιση του πειράματος Hall, (β) η πειραματική διάταξη για την πλακέτα τύπου 1 και (γ) η πειραματική διάταξη για την πλακέτα τύπου 2.

**Τροφοδοσία ρεύματος για την πλακέτα τύπου 1:** Το δείγμα στην πλακέτα 1 (σχήμα 3(α)) τροφοδοτείται 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 3(α). Η μέτρηση της τιμής του ρεύματος γίνεται με πολύμετρο. Ελέγχουμε την ένταση του ρεύματος με τη βοήθεια ενός ποτενσιόμετρου των 500Ω. Για την προστασία του δείγματος (**δεν πρέπει να ξεπεράσουμε τα 40mA**) υπάρχει συνδεδεμένη μία αντίσταση των 330Ω σε σειρά για τον περιορισμό του ρεύματος στο δείγμα.

**Τροφοδοσία ρεύματος για την πλακέτα τύπου 2:** Το δείγμα στην πλακέτα 2 τροφοδοτείται από την ίδια την πλακέτα και η ένταση του ρεύματος ρυθμίζεται από ποτενσιόμετρο επάνω στην πλακέτα.

**Μαγνητικό πεδίο:** Το μαγνητικό πεδίο παράγεται από δύο σε σειρά συνδεδεμένα πηνία που τροφοδοτούνται από μία πηγή συνεχούς τάσης. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου ρυθμίζεται από τη μονάδα του τροφοδοτικού. Ένας αισθητήρας που βρίσκεται στο κέντρο ανάμεσα στους πόλους του ηλεκτρομαγνήτη (probe Hall) μεταφέρει την τιμή του πεδίου στη ψηφιακή ένδειξη ενός Teslometer (όργανο μέτρησης έντασης μαγνητικού πεδίου).

**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.

## Διαδικασία πειράματος

Το πείραμα διεξάγεται σε έναν από τους δύο τύπους πλακέτας γερμανίου και περιλαμβάνει τη λήψη δύο σειρών μετρήσεων. Στην πρώτη περίπτωση μεταβάλλουμε το ηλεκτρικό ρεύμα που διέρχεται από το υλικό, διατηρούμε το μαγνητικό πεδίο σταθερό και μετράμε την τάση Hall. Στη δεύτερη μεταβάλλουμε το μαγνητικό πεδίο, διατηρούμε το ηλεκτρικό ρεύμα σταθερό και μετράμε και πάλι την τάση Hall.

### Για την πλακέτα τύπου 1

- Τοποθετούμε το δείγμα με την πλακέτα ανάμεσα στους πόλους του ηλεκτρομαγνήτη.
- Συνδέουμε τη γεννήτρια RHYWE από τους ακροδέκτες εναλλασσόμενου ρεύματος με τη γέφυρα ανόρθωσης με έξοδο το πυκνωτή των 2000 μF.
- Συνδέουμε την έξοδο της γέφυρας ανόρθωσης με το ποτενσιόμετρο 500 Ω και με αντίσταση 330 Ω.
- Συνδέουμε σε σειρά πολύμετρο (ως αμπερόμετρο).
- Συνδέουμε σε σειρά την πλακέτα (σηματολήπτης A) και ολοκληρώνουμε τη σύνδεση από τον σηματολήπτη B στον πυκνωτή.
- Συνδέουμε το πολύμετρο (ως βολτόμετρο) για τη μέτρηση της τάσης Hall.
- Συνδέουμε τους πόλους του ηλεκτρομαγνήτη στη γεννήτρια RHYWE τους ακροδέκτες σταθερής τάσης.
- Ανάβουμε τα πολύμετρα και ελέγχουμε ότι ο επιλογέας κλίμακας είναι στη σωστή θέση
- Ανάβουμε τις γεννήτριες
- Με μαγνητικό πεδίο μηδέν μετράμε την αντίσταση του υλικού
- Ρυθμίζουμε το μαγνητικό πεδίο σε μια σταθερή τιμή (μικρότερη από 180 mT) από το ποτενσιόμετρο τάσης της γεννήτριας

- Από το ποτενσιόμετρο των 500 Ω μεταβάλλουμε την τιμή του ρεύματος και καταγράφουμε την τιμή της τάσης Hall. Παίρνουμε περίπου 10 τιμές μεταβάλλοντας το ρεύμα μέχρι μέγιστο ρεύμα 40 mA.
- Για τη δεύτερη σειρά μετρήσεων ρυθμίζουμε την ένταση του ρεύματος σε μια σταθερή τιμή (μικρότερη των 40 mA) και μεταβάλλουμε το μαγνητικό πεδίο
- Μόλις συγκεντρώσουμε 10 μετρήσεις το πείραμα ολοκληρώνεται.
- Κλείνουμε τις γεννήτριες και τα πολύμετρα.
- **Αφήνουμε τον πάγκο τακτοποιημένο και σε καλύτερη κατάσταση από ότι τον βρήκαμε.**

### Για την πλακέτα τύπου 2

- Τοποθετούμε το δείγμα με την πλακέτα ανάμεσα στους πόλους του ηλεκτρομαγνήτη.
- Τροφοδοτούμε την πλακέτα με εναλλασσόμενη τάση 12 V~ από τη γεννήτρια LEYBOLD – HERAEUS.
- Συνδέουμε το πολύμετρο (ως βολτόμετρο) για τη μέτρηση της τάσης Hall στους αντίστοιχους ακροδέκτες της πλακέτας.
- Συνδέουμε τη γεννήτρια ΜΑΚΕΔΟΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ στους πόλους του ηλεκτρομαγνήτη.
- Εισάγουμε τον αισθητήρα του μαγνητικού πεδίου (Teslameter) στην υποδοχή της πλακέτας και ανάμεσα στους πόλους του ηλεκτρομαγνήτη.
- Ανάβουμε τις γεννήτριες το πολύμετρο και το Teslameter.
- Με μαγνητικό πεδίο μηδέν μετράμε την αντίσταση του υλικού
- Ρυθμίζουμε το μαγνητικό πεδίο σε μια σταθερή τιμή (μικρότερη από 180 mT) από τον ροοστάτη ρεύματος της γεννήτριας ΜΑΚΕΔΟΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ
- Από το ποτενσιόμετρο της πλακέτας, Ip, μεταβάλλουμε την τιμή του ρεύματος και καταγράφουμε την τιμή της τάσης Hall. **Προσοχή να είναι αναμμένο το λαμπάκι με την ένδειξη mA.**
- Παίρνουμε περίπου 10 τιμές μεταβάλλοντας το ρεύμα μέχρι μέγιστο ρεύμα 40 mA.
- Για τη δεύτερη σειρά μετρήσεων ρυθμίζουμε την ένταση του ρεύματος σε μια σταθερή τιμή (μικρότερη των 40 mA).
- Παίρνουμε περίπου 10 τιμές της τάσης Hall μεταβάλλοντας το μαγνητικό πεδίο από τον ροοστάτη της γεννήτριας ΜΑΚΕΔΟΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ.
- Μόλις συγκεντρώσουμε 10 μετρήσεις το πείραμα ολοκληρώνεται.
- Μηδενίζουμε σιγά σιγά το ρεύμα της πλακέτας
- Θέτουμε στο μηδέν το ροοστάτη της γεννήτριας ΜΑΚΕΔΟΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ
- Κλείνουμε τις γεννήτριες και τα πολύμετρα εκτός από την LEYBOLD – HERAEUS
- **Αφήνουμε τον πάγκο τακτοποιημένο και σε καλύτερη κατάσταση από ότι τον βρήκαμε.**

### **Ανάλυση**

Στην αρχή της εργασίας θα πρέπει **οπωσδήποτε** να περιλαμβάνονται τα στοιχεία

AM	Επώνυμο	Όνομα	Εξάμηνο	Ιδρυματικό email
----	---------	-------	---------	------------------

Υπόδειξη : Η εργασία να ανέβει στο eclass **αποκλειστικά και μόνο σε μορφή PDF** και Το όνομα του αρχείου θα πρέπει να έχει **αυστηρά τη μορφή**

**<αριθμός μητρώου>\_<επώνυμο>\_<όνομα>\_<αριθμός εξαμήνου>**

Δηλαδή

**35481\_Papadopoulos\_Stauros\_2.pdf**

Τα δεδομένα που θα επεξεργαστείτε θα είναι

- Η τάση Hall σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος για σταθερό μαγνητικό πεδίο
- Η τάση Hall σε συνάρτηση με την ένταση του μαγνητικού πεδίου για σταθερή ένταση ηλεκτρικού ρεύματος.

**Στην εργασία που θα παραδώσετε:**

1. Κατασκευάζετε τους πίνακες με τα πειραματικά δεδομένα και τα αποτελέσματα με τις μονάδες τους

Με σταθερό μαγνητικό πεδίο		Με σταθερό ρεύμα		I =	mA	B =	mT
B = mT		I = mA		Κλίση ευθείας			
I (mA)	V <sub>H</sub> (mV)	B (mT)	V <sub>H</sub> (mV)	Συντελεστής R <sub>H</sub>			
				Συγκέντρωση φορέων			
				Επιφάνεια A			
				Μετρημένη αντίσταση			
				Αγωγιμότητα			
				Ευκινισία			

2. Κατασκευάζετε τις γραφικές παραστάσεις της τάση Hall σε συνάρτηση με το ρεύμα και τάσης Hall σε συνάρτηση με το μαγνητικό πεδίο.
3. Κάντε την προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης (αναφέρεται ως Fit ή για το Excel trendline) με την γραμμική συνάρτηση (Linear) στις δύο γραφικές παραστάσεις.
4. Επάνω στις γραφικές παραστάσεις να φαίνεται και η συνάρτηση από την προσαρμογή
5. Χρησιμοποιώντας την κλίση της ευθείας προσαρμογής θα υπολογίσετε τη σταθερά Hall από τις δύο γραφικές παραστάσεις και στην συνέχεια τη συγκέντρωση των φορέων.
6. Από την αντίσταση και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά θα υπολογιστεί η αγωγιμότητα και η ευκινισία των φορέων.
7. Υπάρχει διαφορά στις δύο σταθερές Hall και στις δύο συγκεντρώσεις φορέων που υπολογίσατε και αν ναι που οφείλεται; Αν πιστεύεται ότι οφείλεται σε σφάλμα των οργάνων να υπολογιστεί και αυτό.
8. Περιγράψτε και εξηγήστε αναλυτικά με λόγια. Δε σημειώνουμε μόνο τους αριθμητικούς υπολογισμούς που κάνουμε. (Η εισαγωγή εξισώσεων στο word μπορεί να γίνει πηγαίνοντας στο tab «Insert» και στη συνέχεια «Equation»).
9. Όλα τα παραπάνω βήματα προσμετρώνται στην βαθμολογία της εργασίας.
10. Η εργασία θα πρέπει να ολοκληρωθεί σύμφωνα με τις πληροφορίες που βρίσκονται στη σελίδα:

<https://www.monash.edu/learnhq/excel-at-writing/annotated-assessment-samples/science/science-lab-report>