



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

---

## Προχωρημένα Εργαστήρια Φυσικής Ι

Ελευθέριος Ηλιόπουλος

Τμήμα Φυσικής

---

## Πείραμα II Σιδηρομαγνητική Υστέρηση

Η άσκηση αποσκοπεί στην μέτρηση βασικών φυσικών μεγεθών μαγνητικών υλικών και την εξοικείωση των φοιτητών σε θέματα μαγνητικών ιδιοτήτων της ύλης.

### Μαγνητικές ιδιότητες της ύλης

#### Μαγνητικά δίπολα, μαγνήτιση, κατηγορίες μαγνητικών υλικών.

Οι μαγνητικές ιδιότητες της ύλης μπορούν να μελετηθούν με την αλληλεπίδραση μαγνητικών διπόλων με μαγνητικά πεδία. Η ύπαρξη μαγνητικών μονοπόλων είναι ένα ανοιχτό ερώτημα, αλλά σε κάθε περίπτωση η συνήθης ύλη αποτελείται από μαγνητικά δίπολα. Τα δίπολα αυτά είτε υπάρχουν είτε επάγονται από εξωτερικά μαγνητικά πεδία. Μακροσκοπικά παραδείγματα μαγνητικών διπόλων είναι ένα σωληνοειδές, ένας μόνιμος μαγνήτης, ή ένας βρόγχος ρεύματος. Μικροσκοπικά παραδείγματα είναι ορισμένα στοιχειώδη σωμάτια από τα οποία το ηλεκτρόνιο είναι εκείνο στο οποίο οφείλονται οι μαγνητικές ιδιότητες των υλικών. Υπενθυμίζουμε ότι η **μαγνητική διπολική ροπή** ενός ρεύματος  $I$  και επιφάνειας  $A$  είναι:

$$\vec{\mu}_I = I \cdot \vec{A} \quad (\text{Εξ.1})$$

Η ολική μαγνητική διπολική ροπή ενός ατόμου ή ιόντος  $\vec{\mu}_J$  προκύπτει από την ισοδυναμία της κίνησης των ηλεκτρονίων (τροχιακή στροφορμή και spin) με έναν βρόχο ρεύματος:

$$\vec{\mu}_J = -\mu_B \cdot \left( \sum_i \vec{l}_i + \sum_i g_s \cdot \vec{s}_i \right) = -\mu_B \cdot (\vec{L} + 2 \cdot \vec{S}) = -\mu_B \cdot (\vec{J} + \vec{S}) \quad (\text{Εξ.2})$$

όπου:

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} : \text{η μαγνητόνη του Bohr}$$

$$\vec{l}_i, \vec{s}_i : \text{η τροχιακή στροφορμή και το spin του } i\text{-ηλεκτρονίου}$$

$$g_s \approx 2 : \text{ο γυρομαγνητικός λόγος του spin}$$

$$\vec{L} = \sum_i \vec{l}_i : \text{η ολική τροχιακή στροφορμή των ηλεκτρονίων}$$

$$\vec{S} = \sum_i \vec{s}_i : \text{το ολικό spin}$$

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S} : \text{η ολική στροφορμή (παραδοχή σύζευξης L-S)}$$

Η μαγνητική διπολική ροπή του πυρήνα θεωρείται αμελητέα καθώς η μαγνητόνη του πυρήνα  $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$  είναι πολύ μικρότερη της μαγνητόνης Bohr, αφού

$$\frac{m_e}{m_p} \ll 1.$$

Μακροσκοπικά η μαγνητική κατάσταση των υλικών περιγράφεται με το **διάνυσμα της μαγνήτισης**  $\vec{M}$  :

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{\mu}}{\Delta V} \quad (\text{Εξ.3})$$

όπου  $\sum \vec{\mu}$  το διανυσματικό άθροισμα των μικροσκοπικών μαγνητικών ροπών που βρίσκονται στον όγκο  $\Delta V$ . Το μέτρο επομένως της μαγνήτισης ισούται με τη μαγνητική ροπή ανά μονάδα όγκου του υλικού.

Παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου (μαγνητική επαγωγή)  $\vec{B}_0$ , το ολικό πεδίο στο εσωτερικό του μαγνητικού υλικού είναι:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_M = \vec{B}_0 + \mu_0 \cdot \vec{M} \quad (\text{Εξ.4})$$

όπου  $\mu_0$  η **μαγνητική διαπερατότητα** του κενού και  $\mu_0 \cdot \vec{M}$  το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από την μαγνήτιση του υλικού.

Εισάγοντας το μέγεθος του **μαγνητίζοντος πεδίου (ένταση μαγνητικού πεδίου)**:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$$

η Εξ.4 γράφεται ως:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \quad (\text{Εξ.5})$$

Έτσι, ο νόμος του Ampere ( $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I$ ), παρουσία μαγνητικού υλικού, γράφεται:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0(I + I_M) \quad (\text{Εξ.6})$$

όπου:

$I$  : το ρεύμα που περνάει από μια επιφάνεια που ορίζει η κλειστή διαδρομή του ολοκληρώματος που δημιουργεί το εξωτερικό πεδίο  $\vec{B}_0$

$I_M = \oint \vec{M} \cdot d\vec{l}$  : το ρεύμα στο εσωτερικό του υλικού, (το συνολικό ρεύμα στο εσωτερικό του υλικού που προκύπτει από όλους τους στοιχειώδεις βρόχους) που προκαλεί την μαγνήτιση.

Ο νόμος του Ampere επομένως μπορεί να γραφτεί:

$$\oint (\vec{B} - \mu_0 \vec{M}) \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \Rightarrow \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \quad (\text{Εξ.7})$$

Σε πολλά υλικά η μαγνήτιση είναι ανάλογη του  $H$

$$\vec{M} = \chi \cdot \vec{H} \quad (\text{Εξ.8})$$

όπου ο συντελεστής  $\chi$  ονομάζεται **μαγνητική επιδεκτικότητα** του υλικού.

Από τις Εξ.5 και Εξ.8 έχουμε:

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot (\vec{H} + \chi \cdot \vec{H}) = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \cdot \vec{H} \quad (\text{Εξ.9})$$

όπου

$$\mu = \mu_0 \cdot (1 + \chi) \text{ η μαγνητική διαπερατότητα του υλικού.}$$

Ο λόγος  $k_m = \frac{B}{B_0} = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \chi$  ονομάζεται **σχετική μαγνητική διαπερατότητα**

και η μαγνήτιση του υλικού γράφεται:

$$\vec{M} = (k_m - 1) \cdot \vec{H} \quad (\text{Εξ.10})$$

Συνήθως ταξινομούμε τα υλικά σε **παραμαγνητικά** και **σιδηρομαγνητικά**, των οποίων τα άτομα έχουν μόνιμη μαγνητική διπολική ροπή και **διαμαγνητικά**, των οποίων τα άτομα δεν έχουν μόνιμη μαγνητική διπολική ροπή. Ο πίνακας 1 δίνει τους λόγους  $\mu/\mu_0$  και  $k_m/1$ .

Πίνακας 1

|                |                 |             |
|----------------|-----------------|-------------|
| Παραμαγνητικά: | $\mu > \mu_0$   | $k_m > 1$   |
| Διαμαγνητικά:  | $\mu < \mu_0$   | $k_m < 1$   |
| Σιδημαγνητικά: | $\mu \gg \mu_0$ | $k_m \gg 1$ |
| Κενό:          | $\mu = \mu_0$   | $k_m = 1$   |

Η φυσική έννοια του περιεχομένου του πίνακα σχετίζεται με τον προσανατολισμό των μόνιμων η επαγόμενων μαγνητικών ροπών παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου.

Ένα εξωτερικό μαγνητικό πεδίο  $\vec{B}_0$  ασκεί ροπή

$$\vec{\tau} = \vec{\mu}_J \times \vec{B}_0 \quad (\text{Εξ.11})$$

στα μαγνητικά δίπολα  $\vec{\mu}_J$  τα οποία, κάνοντας μεταπτωτική κίνηση γύρω από το πεδίο, τείνουν να προσανατολιστούν παράλληλα προς αυτό προκαλώντας έτσι την μακροσκοπική μαγνήτιση του υλικού και συνολικό πεδίο  $\vec{B}$ .

Τα άτομα ή ιόντα των **παραμαγνητικών** υλικών (π.χ. μεταβατικά στοιχεία, σπάνιες γαίες κλπ.) έχουν μεν μόνιμη μαγνητική ροπή, ο προσανατολισμός όμως όλων των ροπών είναι τυχαίος έτσι ώστε απουσία εξωτερικού πεδίου το υλικό να μην παρουσιάζει μαγνήτιση. Στον παραμαγνητισμό, ένα εξωτερικό πεδίο προσανατολίζει μερικά τις μαγνητικές ροπές κατά την διεύθυνση και φορά του έτσι ώστε το υλικό να εμφανίζει μαγνήτιση παράλληλη και της ίδιας φοράς με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο ( $\mu > \mu_0$ ).

Στην ευθυγράμμιση των μαγνητικών ροπών, των ατόμων των παραμαγνητικών υλικών, με το εξωτερικό μαγνητικό πεδίο, αντιτίθεται η θερμική κίνηση των ατόμων (ή ιόντων). Η εξάρτηση της μαγνήτισης από την θερμοκρασία  $T$  δίνεται από τον **νόμο του Curie**:

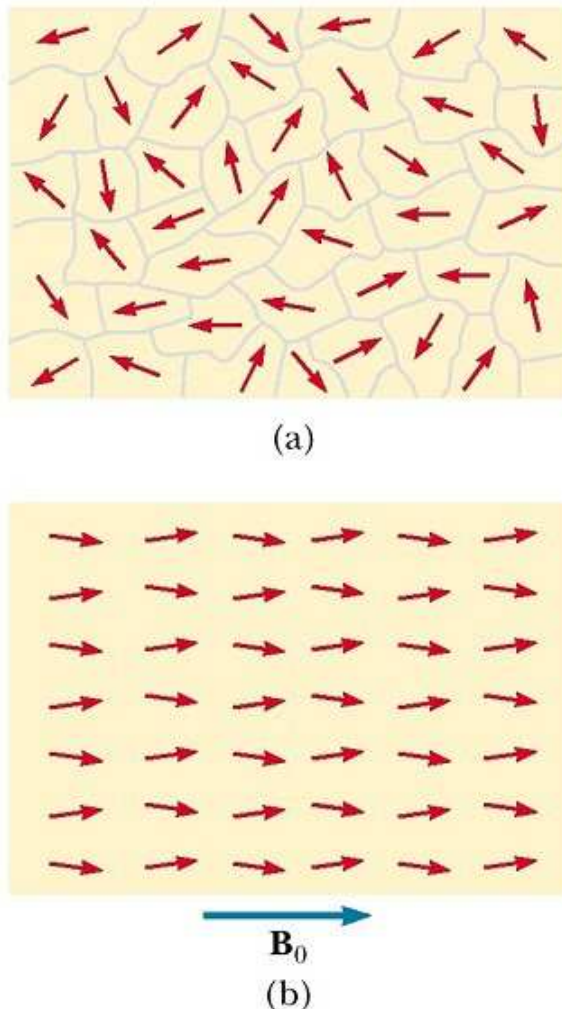
$$\vec{M} = C \cdot \frac{\vec{B}}{T} \quad (\text{Εξ.12})$$

όπου  $C$  η **σταθερά Curie**. Η σχέση (12) δεν ισχύει για υψηλά μαγνητικά πεδία, ή χαμηλές θερμοκρασίες όπου η μαγνήτιση παρουσιάζει κορεσμό.

Τα άτομα ή ιόντα των **διαμαγνητικών** υλικών (π.χ. βισμούθιο, άργυρος κλπ.) δεν έχουν μαγνητική διπολική ροπή. Ακόμα και αν  $\vec{l}_i, \vec{s} \neq \vec{0}$ , ο προσανατολισμός των στροφορμών των ηλεκτρονίων είναι τέτοιος ώστε η σύζευξή τους να δίνει μηδενική ολική ατομική μαγνητική διπολική ροπή ( $\vec{\mu}_J = \vec{0}$ ). Εφαρμογή εξωτερικού μαγνητικού πεδίου έχει σαν συνέπεια την επαγωγή μιας ασθενούς διπολικής ροπής με φορά αντίθετη προς το εξωτερικό πεδίο ( $\mu < \mu_0$ ). Ο **διαμαγνητισμός** είναι φαινόμενο που παρατηρείται σε όλα τα υλικά, αλλά είναι ασθενές σε σύγκριση με το φαινόμενο του παραμαγνητισμού ή του σιδηρομαγνητισμού. Ο διαμαγνητισμός οφείλεται στο ότι ενώ μεν η αντιπαράλληλη και παράλληλη προς το πεδίο συνιστώσες της ατομικής μαγνητικής ροπής αλληλοαναιρούνται απουσία πεδίου, όταν εφαρμόσουμε το πεδίο η μεν αντιπαράλληλη αυξάνει η δε παράλληλη μειώνεται λόγω διαταραχής της ηλεκτρονικής κίνησης (σε μια απλοποιημένη κλασική εικόνα αύξηση ή μείωση του μέτρου της τροχιακής

ταχύτητας των αντίστοιχων ηλεκτρονίων). Η συνισταμένη μαγνητική διπολική ροπή είναι τώρα διάφορη του μηδενός και αντιπαράλληλη προς το εξωτερικό πεδίο.

**Σιδηρομαγνητικά** υλικά είναι ο σίδηρος (Fe), το κοβάλτιο (Co), το νικέλιο (Ni), το γαδολίνιο (Gd) και το δυσπρόσιο (Dy) και είναι ισχυρά μαγνητικά υλικά. Τα υλικά αυτά παρουσιάζουν μαγνητικές διπολικές ροπές σε ατομικό επίπεδο η οποίες τείνουν να ευθυγραμμισθούν μεταξύ τους ακόμα και σε ασθενές εξωτερικό πεδίο. Αν αφαιρεθεί το εξωτερικό πεδίο το υλικό παραμένει μαγνητισμένο. Αυτή η μόνιμη ευθυγράμμιση οφείλεται στην ισχυρή σύζευξη γειτονικών μαγνητικών ροπών. Η σύζευξη αυτή δεν είναι λόγω της μαγνητικής τους αλληλεπίδρασης, αλλά λόγω του ότι η ατομική δομή των υλικών αυτών είναι τέτοια ώστε σε γειτονικά άτομα συμφέρει ενεργειακά να έχουν τα spin τους παράλληλα. Η σύζευξη αυτή είναι κβαντικής φύσης και ονομάζεται σύζευξη ανταλλαγής. Το υλικό εμφανίζει μικροσκοπικές περιοχές μέσα στις οποίες όλες οι μαγνητικές ροπές είναι ευθυγραμμισμένες. Οι περιοχές αυτές ονομάζονται **μαγνητικές περιοχές** ή περιοχές **Weiss** και το μέγεθος των οποίων είναι μεταξύ  $10^{-8}$  και  $10^{-12}$  m<sup>3</sup>. Απουσία μαγνητικού πεδίου οι περιοχές έχουν τυχαία προσανατολισμό. Παρουσία πεδίου προσανατολίζονται με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση του μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό ή κοντά στο υλικό ( $\mu \gg \mu_0$ ).

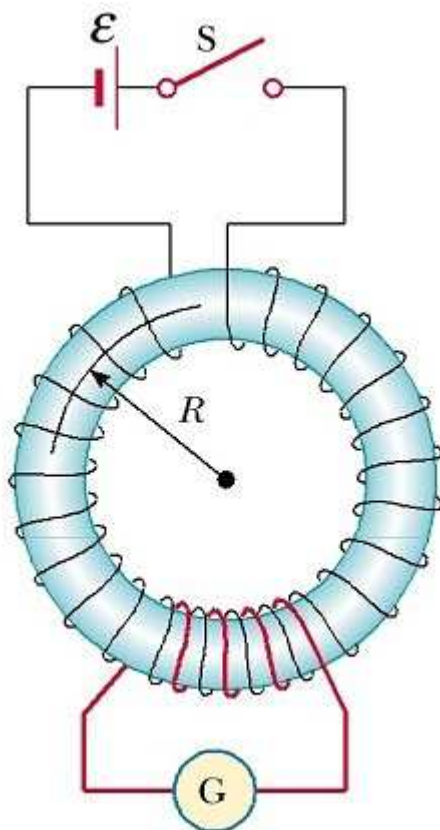


Σχήμα 1: Περιοχές Weiss σε σιδηρομαγνητικό υλικό (a) απουσία μαγνητικού πεδίου και (b) παρουσία ισχυρού πεδίου

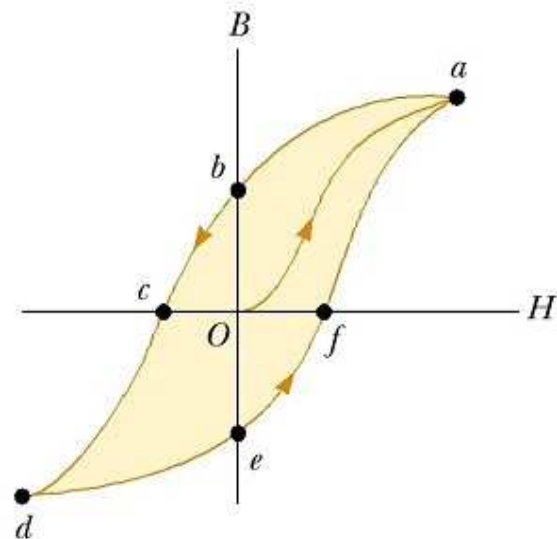
Πάνω από ένα όριο θερμοκρασίας, το οποίο ονομάζεται **θερμοκρασία Curie**, η σύζευξη ανταλλαγής παύει να υπάρχει και το σιδηρομαγνητικό υλικό συμπεριφέρεται σαν παραμαγνητικό.

Η σχέση του ολικού μαγνητικού πεδίου με το μαγνητίζον πεδίο (Εξ.9), σε ένα σιδηρομαγνητικό υλικό, δεν είναι γραμμική διότι η μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από το  $H$ . Επιπλέον η τιμή της  $\mu$  εξαρτάται και από τη «μαγνητική προϊστορία» του υλικού, δηλαδή παρουσιάζεται το φαινόμενο της **μαγνητικής υστέρησης**.

Το Σχ.2 δείχνει την πειραματική διάταξη γνωστή σαν **δακτύλιος του Rowland**, με την οποία μπορεί να μετρηθεί η καμπύλη  $B = f(H)$ , που **ονομάζεται καμπύλη μαγνήτισης**.



Δακτύλιος του Rowland



Καμπύλη υστέρησης

Σχήμα 2

Το  $H$  μετριέται μετρώντας το ρεύμα  $I_0$  που διαρρέει το πρωτεύον πηνίο του δακτυλίου. Σύμφωνα με την Εξ.7:

$$H \cdot 2\pi R = N \cdot I_0 \Rightarrow H = \frac{N}{2\pi R} \cdot I_0 \quad (\text{Εξ.13})$$

όπου  $N$  ο αριθμός των σπειρών του πρωτεύοντος πηνίου και  $R$  η ακτίνα του πυρήνα.

Μεταβάλλοντας το ρεύμα  $I_0$ , το  $H$  μπορεί να μετρηθεί μετρώντας, π.χ. με ένα γαλβανόμετρο (G), την επαγόμενη στο δευτερεύον πηνίο (λόγω μεταβολής της μαγνητικής ροής που το διαπερνά) ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ).

Θεωρούμε αρχικά ένα αμαγνήτιστο υλικό. Για να πάρουμε την καμπύλη μαγνήτισης αυξάνουμε το πεδίο  $H$  από την τιμή μηδέν μέχρι μια μέγιστη τιμή. Αυτό παριστάνεται από το τμήμα της καμπύλης 0-α.

Με το υλικό μαγνητισμένο στην κατάσταση α ( $B = B_s$ ) η ελάττωση του πεδίου  $H$  δεν δίνει τιμές του  $B$  που να βρίσκονται πάνω στην αρχική καμπύλη μαγνήτισης. Ελάττωση του πεδίου  $H$  ακολουθείται από ελάττωση του  $B$  αλλά κατά μήκος μιας νέας καμπύλης μαγνήτισης. Όταν το  $H$  έχει την τιμή μηδέν (σημείο b) υπάρχει ακόμα μαγνητικό πεδίο τιμής  $B_r$ . Το πεδίο αυτό ονομάζεται **παραμένον πεδίο** (Remanence). Στη συνέχεια αντιστρέφουμε την διεύθυνση του  $H$  μέχρις ότου να έχουμε  $B = 0$  (σημείο c). Αυτό το έχουμε για μια τιμή του  $H = H_0$ . Το  $H_0$  λέγεται **συνεκτικό πεδίο**. Με παραπέρα μεταβολές στην ίδια κατεύθυνση φθάνουμε στην κατάσταση d όπου τα  $B$  και  $H$  έχουν και τα δύο διευθύνσεις αντίθετες απ' αυτές που είχαν στην κατάσταση α. Αν τώρα αλλάξουν τη φορά του  $H$  θα διαγράψουμε το κάτω μέρος της καμπύλης ως την κατάσταση α. Η κλειστή καμπύλη  $B = f(H)$  λέγεται **βρόγχος υστέρησης**. Η υστέρηση οφείλεται στο ότι τα όρια των μαγνητικών περιοχών του υλικού αντί να μετακινούνται ελεύθερα καθώς τα  $H$  και  $M$  αλλάζουν τείνουν να ακινητοποιούνται στις κρυσταλλικές ατέλειες.

Έτσι μπορούμε να πούμε ότι ο μόνιμος μαγνητισμός οφείλεται στην υστέρηση. Ένα καλό υλικό που προορίζεται για μόνιμους μαγνήτες θα πρέπει να έχει μεγάλες τιμές  $B_r$  και  $H_0$ . Την ιδιότητα της υστέρησης των υλικών εκμεταλλευόμαστε στις μαγνητικές ταινίες εγγραφής. Η τιμή  $B_s$  της  $B$  στη θέση α δείχνει πως όλες σχεδόν οι τιμές στις μαγνητικές περιοχές έχουν τον ίδιο προσανατολισμό. Για τον πυρήνα ενός ηλεκτρομαγνήτη η τιμή  $B_r$  θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη μια και αυτή προσδιορίζει το μέγεθος του μαγνητικού πεδίου που μπορούμε να δημιουργήσουμε. Το εμβαδόν της καμπύλης υστέρησης δίνει την ενέργεια που μετατρέπεται σε θερμότητα σε κάθε κύκλο. Σ' ένα μετασχηματιστή που η μαγνήτιση του πυρήνα ακολουθεί την καμπύλη υστέρησης πολλές φορές ανά μονάδα χρόνου (το ρεύμα που διαρρέει ένα μετασχηματιστή είναι εναλλασσόμενο συχνότητας  $\omega$ ) θα πρέπει το εμβαδόν που περιέχεται στην καμπύλη  $B = f(H)$  να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο.

### Μαγνητικά κυκλώματα

Έστω ότι ο δακτύλιος που χρησιμοποιήσαμε στα προηγούμενα αποτελείται από δύο τμήματα: Το ένα μήκους  $l_1$ , εμβαδού διατομής  $A_1$  και μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu_1$  και το άλλο μήκους  $l_2$ , εμβαδού διατομής  $A_2$ , και μαγνητικής διαπερατότητας  $\mu_2$ .

Από τον νόμο του Ampere στην περίπτωση αυτή έχουμε:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \Rightarrow H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 = N \cdot I_0 \quad (\text{Εξ.14})$$

δηλαδή

$$\frac{B_1}{\mu_1} \cdot l_1 + \frac{B_2}{\mu_2} \cdot l_2 = N \cdot I_0 \quad (\text{Εξ.15})$$

Στο κύκλωμα η μαγνητική ροή  $\Phi$  διατηρείται σταθερή:

$$\Phi = B_1 \cdot A_1 = B_2 \cdot A_2 \quad (\text{Εξ.16})$$

Από τις Εξ.15 και Εξ.16 έχουμε:

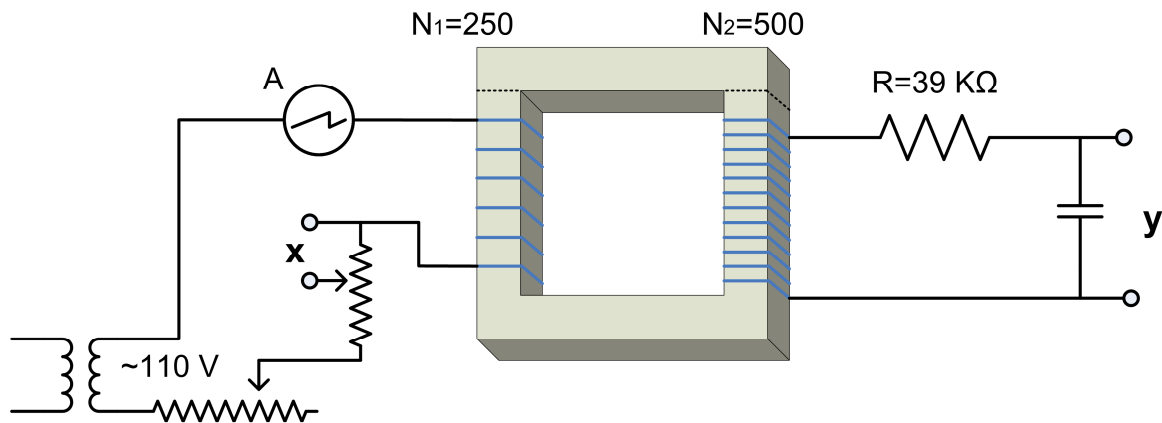
$$\Phi \cdot \frac{l_1}{\mu_1 \cdot A_1} + \Phi \cdot \frac{l_2}{\mu_2 \cdot A_2} = \Phi \cdot \left( \frac{l_1}{\mu_1 \cdot A_1} + \frac{l_2}{\mu_2 \cdot A_2} \right) = N \cdot I_0 \quad (\text{Εξ.17})$$

Η σχέση της Εξ.16 είναι ανάλογη της σχέσης  $E = i \cdot R$  του ηλεκτρισμού. Στο ρεύμα  $i$  ενός ηλεκτρικού κυκλώματος αντιστοιχεί η ροή  $\Phi$  ενός μαγνητικού κυκλώματος. Το γινόμενο  $N \cdot I_0$  αντιστοιχεί στην ΗΕΔ  $E$  και ο όρος  $\frac{l}{\mu A}$  στην αντίσταση  $R = \frac{l}{\sigma A}$  του αγωγού του κυκλώματος ( $\sigma$  η ειδική αγωγιμότητα του αγωγού).

### Πειραματική διαδικασία

#### Μετρήσεις με πυρήνα μετασχηματιστή

Συνδεσμολογήστε το κύκλωμα του σχήματος 3.



Σχήμα 3

Ο πυρήνας του μετασχηματιστή αποτελείται από φύλλα σιδηρομαγνητικού υλικού μονωμένα μεταξύ τους. Οι διαστάσεις του είναι:

$$\text{Εμβαδό διατομής } A = 16 \text{ cm}^2$$

$$\text{Ολικό μήκος } L = 44 \text{ cm}$$

Ο πυρήνας περιβάλλεται από δύο πηνία με  $N_1 = 250$  σπείρες (πρωτεύον) να  $N_2 = 500$  σπείρες (δευτερεύον). Συνδέστε το πρωτεύον με την πηγή των 110V (μετασχηματιστής). Χρησιμοποιείστε τέτοιες αντιστάσεις ώστε αρχικά το ρεύμα στο πρωτεύον να είναι μικρότερο από 0.2A. Συνδέστε τα x και y με τις εισόδους x και y του παλμογράφου.

**Προσοχή:** Τα 110V είναι επικίνδυνα!!!

Η μέτρηση της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $H$  προκύπτει από τον νόμο του Ampere:

$$\oint H dl = I \Rightarrow H \cdot L = N_1 \cdot I_1 \Rightarrow H = \frac{N_1}{L} \cdot I_1 \quad (\text{Εξ.18})$$

Η μέτρηση της επαγωγής  $B$  γίνεται ως εξής:

Στο δευτερεύον αναπτύσσεται εξ' επαγωγής ΗΕΔ  $E$ , που δίνεται από το νόμο του Faraday:

$$B = -\frac{d\Phi}{dt} = -N_2 \cdot A \cdot \frac{dB}{dt} \quad (\text{Εξ.19})$$



όπου  $\Phi$  η μαγνητική ροή.

Αν ολοκληρώσουμε τη σχέση (19) βρίσκουμε:

$$\int E dt = N_2 \cdot A \cdot B \quad (\text{Εξ.20})$$

(το πρόσημο παραλήφθηκε γιατί δεν έχει σημασία στις μετρήσεις μας).

Επειδή το  $B$  μεταβάλλεται περιοδικά μπορούμε να το μετρήσουμε με τον παλμογράφο:

$$V_y = \frac{q}{C} = \int \frac{I_2}{C} dt = \frac{1}{RC} \cdot \int E dt = \frac{N_2 \cdot A \cdot B}{RC} \Rightarrow B = \frac{R \cdot C}{N_2 \cdot A} \cdot V_y \quad (\text{Εξ.21})$$

όπου:

$R$  : η τιμή της αντίστασης και

$C$  : η χωρητικότητα του πυκνωτή

των στοιχείων, με τα οποία γίνεται η ολοκλήρωση (βλ. Σχ.3).

Χρησιμοποιήθηκε η σχέση  $I_2 = E / R$  για το ρεύμα του δευτερεύοντος, η οποία ισχύει εφ' όσον  $2\pi \cdot f \cdot RC \ll 1$  με  $f = 50 \text{ Hz}$  η συχνότητα του δικτύου.

Η τιμή της  $B$  σε κάθε σημείο της καμπύλης υστέρησης μπορεί να προσδιοριστεί επομένως από την τιμή της τάσης  $V_y$  όπως αυτή μετριέται στον παλμογράφο.

**(α)** Μετρήστε την καμπύλη υστέρησης του πυρήνα στον παλμογράφο και σχεδιάστε την.

**(β)** Υπολογίστε τις ποσότητες  $B_r$ ,  $B_s$  και  $H$ .

**(γ)** Υπολογίστε την μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  του πυρήνα και παραστήστε την γραφικά ως συνάρτηση του  $H$ .

**(δ)** Υπολογίστε τις απώλειες σε θερμότητα ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα όγκου του δείγματος.

### Επίδραση του αέρα στο μαγνητικό κύκλωμα

Απομακρύνετε το επάνω μέρος του πυρήνα του μετασχηματιστή. Οι μαγνητικές δυναμικές γραμμές κλείνουν τώρα μέσα από τον αέρα. Ο πυρήνας αποτελείται τώρα από δύο υλικά, το αρχικό και τον αέρα.

**(α)** Μετρήστε την καμπύλη υστέρησης και σχεδιάστε την.

**(β)** Από την καμπύλη υστέρησης προσδιορίστε τη μαγνητική διαπερατότητα του αέρα.

**(γ)** Δικαιολογήστε την τιμή που βρήκατε.

### Μετρήσεις με σιδερένια ράβδο

Τοποθετήστε τη σιδερένια ράβδο σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίεδου που σας δίνεται στο πάνω μέρος του πυρήνα.

**(α)** Μετρήστε την καμπύλη υστέρησης και προσδιορίστε τα  $B_r$ ,  $B_s$  και  $H$ .

**(β)** Παραστήστε γραφικά την μαγνητική διαπερατότητα  $\mu$  της ράβδου ως συνάρτηση του  $H$ . (Η μαγνητική διαπερατότητα της ράβδου και του πυρήνα είναι της ίδια τάξης μεγέθους).

**(γ)** Πόση ενέργεια καταναλώνεται ανά μονάδα χρόνου και όγκου στο υλικό της ράβδου;

**(δ)** Συγκρίνατε τις τιμές των παραμέτρων που βρήκατε για τα διάφορα υλικά.

### Βιβλιογραφία

R.A. Serway "Physics for Scientists & Engineers", Τόμος II Ηλεκτρομαγνητισμός, Third Edition, Saunders College Publishing, (1990). Απόδοση στα ελληνικά Λ. Κ. Ρεσβάνη.

E. M. Purcell "*Electricity and Magnetism*", Berkley physics course – volume 2, McGraw-Hill (1996).

R. P. Feynman "Lectures on Physics" Vol. II, Addison-Wesley Publishing Company (1975).

M. Alonso and E. J. Finn "Fundamental University Physics" Vol. II Fields and Waves, Addison-Wesley Publishing Company (1978).

[Η παρούσα σελίδα είναι επίτηδες κενή]

# Σημειώματα

## Σημείωμα αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Κρήτης, Ελ. Ηλιόπουλος, 2014. «Προχωρημένα Εργαστήρια Φυσικής Ι.». Έκδοση: 1.0. Ηράκλειο 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://opencourses.uoc.gr>.

## Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση, Όχι Παράγωγο Έργο 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

## Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

## Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Κρήτης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

