

# Άσκηση 8

## Εξάρτηση της αντίστασης αγωγού από τη θερμοκρασία

### 8.1. Σκοπός

Στην άσκηση αυτή προσδιορίζεται η καμπύλη της εξάρτησης της αντίστασης του βολφραμίου από τη θερμοκρασία και υπολογίζεται ο θερμικός συντελεστής αντίστασης του βολφραμίου στις υψηλές θερμοκρασίες.

Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα στον σπουδαστή να μελετήσει ποιοτικά το φαινόμενο της ισχύος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ένα θερμό στερεό σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του.

### 8.2. Γενικά

#### 8.2.1. Μεταβολή της αντίστασης με τη θερμοκρασία

Είναι γνωστό ότι η αντίσταση ενός αγωγού εξαρτάται από τα γεωμετρικά του στοιχεία και δίνεται από τη σχέση  $R = \rho L/S$ , όπου  $L$  είναι το μήκος του αγωγού,  $S$  η επιφάνεια της διατομής του και  $\rho$  η ειδική αντίσταση που εξαρτάται από τη φύση του υλικού και τη θερμοκρασία.

Η σχέση που συνδέει την αντίσταση ενός αγωγού με τη θερμοκρασία έχει τη μορφή:

$$R_{\theta} = R_0 (1 + \alpha\theta) \quad (8.1)$$

όπου  $\alpha$  είναι ο θερμικός συντελεστής αντίστασης,  $\theta$  η θερμοκρασία και  $R_0$  η τιμή της αντίστασης για  $\theta = 0$  °C. Ο θερμικός συντελεστής αντίστασης είναι θετικός για τα μέταλλα και αρνητικός για τον άνθρακα και τους ημιαγωγούς.

Για το βολφράμιο, από το οποίο είναι κατασκευασμένο το νήμα στις λυχνίες πυρακτώσεως, ο θερμικός συντελεστής αντίστασης για την περιοχή 0–100 °C έχει την τιμή  $3,92 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Μπορούμε να προσδιορίσουμε εύκολα την αντίσταση ενός αγωγού από τον νόμο του Ohm  $V = RI$ , μετρώντας την τάση στα άκρα του και το ρεύμα που τον διαρρέει. Επειδή η αντίσταση μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, η καμπύλη του  $U$  συναρτήσει του  $I$  δεν είναι ευθεία, αλλά καμπύλη με τα κοίλα προς τα πάνω ή κάτω, ανάλογα με τον αν η αντίσταση αυξάνεται ή ελαττώνεται με τη θερμοκρασία, αντιστοίχως.

Στην πραγματικότητα, η σχέση που συνδέει την αντίσταση με τη θερμοκρασία, στις υψηλές θερμοκρασίες δεν είναι γραμμική αλλά έχει τη μορφή:

$$R_{\theta} = R_0 (1 + \alpha\theta + \beta\theta^2 + \gamma\theta^3 + \dots) \quad (8.2)$$

Σε πολλά πρακτικά προβλήματα όμως, όπως και στην άσκηση αυτή, χρησιμοποιούμε προσεγγιστικά την Εξ.(8.1) θεωρώντας ότι ο συντελεστής  $\alpha$  δεν είναι μία σταθερά αλλά εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

Το βολφράμιο είναι το πιο πυρίμαχο μέταλλο (θερμοκρασία τήξης 3380 °C), και για το λόγο αυτό βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην επιστημονική έρευνα και σε διάφορες συσκευές υψηλής τεχνολογίας. Σε θερμοκρασία δωματίου ο θερμικός συντελεστής αντίστασης,  $\alpha$ , είναι περίπου  $4,1 \times 10^{-3} \text{ } \text{K}^{-1}$ . Επίσης, υπό κανονικές συνθήκες, είναι ανοξειδωτο, καθώς η οξειδωσή του αρχίζει σε θερμοκρασίες άνω των 400 °C. Αλλά έχει και ένα «αδύνατο σημείο»: η αντίστασή του έντονα εξαρτάται από τη θερμοκρασία (υπάρχουν εφαρμογές όπου το

«αδύνατο σημείο» είναι «δυνατό»). Πράγματι, στο θερμοκρασιακό διάστημα 273-2500 K, η αντίσταση του βολφραμίου μεταβάλλεται περίπου 15 φορές! Αυτό εξηγεί γιατί μερικές φορές αδυνατούμε να θέσουμε σε λειτουργία μια λάμπα πυρακτώσεως μεγάλης ισχύος, για παράδειγμα 880 W, που όταν είναι θερμή ( $\approx 2500$  K) διαρρέεται από ρεύμα 4 A ( $220\text{V} \times 4\text{A} = 880\text{W}$ ). Στην αρχή, όταν η λάμπα είναι ψυχρή, η αντίσταση του νήματός της είναι 15 φορές μικρότερη και επομένως, όταν ανοίγουμε το διακόπτη, το αρχικό ρεύμα στη λάμπα είναι 15 φορές μεγαλύτερο ή περίπου 60 A! Στον ηλεκτρολογικό πίνακα το ρεύμα αυτό αμέσως θα «ρίξει κάτω» το ρελέ ασφαλείας που συνήθως είναι των 16 A.

### 8.2.2. Ακτινοβολία μέλανος σώματος

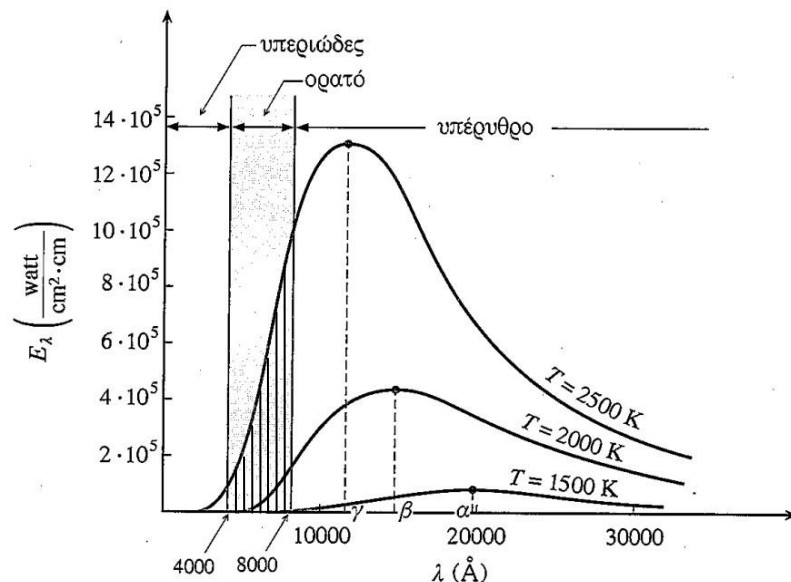
Στις υψηλές θερμοκρασίες τα σώματα, εκτός από τις μεταβολές των ιδιοτήτων που υφίστανται, συγχρόνως ακτινοβολούν, όπως για παράδειγμα το σύρμα βολφραμίου στις λυχνίες πυρακτώσεως.

Οι νόμοι της ακτινοβολίας εμπεριέχονται στη σχέση που έδωσε ο Planck για το μέλαν σώμα, που έχει τη μορφή:

$$E_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{kT\lambda}\right) - 1} \quad (8.3)$$

όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός,  $k$  η σταθερά του Boltzmann,  $h$  η σταθερά του Planck,  $\lambda$  το μήκος κύματος και  $E_\lambda$  είναι η συνάρτηση κατανομής της αφετικής ικανότητας, δηλαδή η ακτινοβολούμενη ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα μήκους κύματος στην περιοχή μήκους κύματος  $\lambda$ .

Επειδή η Εξ. (8.3) δεν είναι εύκολα κατανοητή, δίνεται η γραφική της απεικόνιση στο Σχ. 8.1.



**Σχήμα 8.1.** Η ακτινοβολούμενη ισχύς ανά  $\text{cm}^2$  και μονάδα μήκους κύματος ως συνάρτηση του μήκους κύματος  $\lambda$  με παράμετρο την απόλυτη θερμοκρασία  $T$ .

Είναι φανερό ότι το γινόμενο  $E_\lambda d\lambda$  εκφράζει την ισχύ που ακτινοβολείται ανά μονάδα επιφάνειας στα μήκη κύματος μεταξύ  $\lambda$  και  $\lambda + d\lambda$  σε κάθε θερμοκρασία και ισούται με το εμβαδόν που περικλείεται από την αντίστοιχη καμπύλη του Σχ. 8.1 και τον άξονα των  $\lambda$  στην περιοχή μεταξύ  $\lambda$  και  $\lambda + d\lambda$ .

### 8.3. Μέθοδος

Η θερμοκρασία του σύρματος βολφραμίου μπορεί να ρυθμιστεί με τη μεταβολή του ρεύματος που διαρρέει το σύρμα. Για το βολφράμιο υπάρχει εμπειρική σχέση που δίνει τη θερμοκρασία του νήματος ως συνάρτηση του ρεύματος και της διαμέτρου του σύρματος. Η γραφική παράσταση αυτής της σχέσης φαίνεται στο Σχ. 8.3.

Η αντίσταση του σύρματος στις διάφορες θερμοκρασίες προσδιορίζεται από τον νόμο του Ohm ( $R = V/I$ ).

Έτσι, αν χρησιμοποιηθεί μία λυχνία βολφραμίου, είναι εύκολο πειραματικά να προσδιοριστεί η αντίσταση του νήματός της για θερμοκρασίες από εκείνην του περιβάλλοντος ως τους  $2500^{\circ}\text{C}$ .

### 8.4. Πειραματική διάταξη

Για την εκτέλεση του πειράματος απαιτούνται:

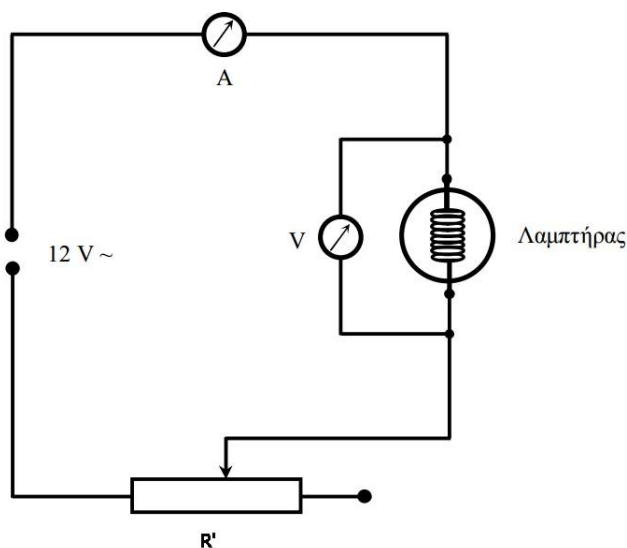
Μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης  $12\text{V}$ , μία λυχνία με νήμα από σύρμα βολφραμίου, μία ρυθμιζόμενη αντίσταση,  $R'$ , ένα βολτόμετρο,  $V$ , και ένα αμπερόμετρο,  $A$  (Σχ. 8.2).

### Βιβλιογραφία

1. *Μαθήματα Φυσικής Berkeley*, Τόμος II: *Ηλεκτρισμός-Μαγνητισμός*, Κεφ.4 (Αθήνα, 1978).
2. Κ. Αλεξόπουλος, *Γενική Φυσική. Θερμότης*. Παράγρ. 186,193.
3. Κ. Αλεξόπουλος, *Γενική Φυσική. Ηλεκτρισμός*. Παράγρ. 148.
4. *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής*, Τόμος I, ΕΜΠ, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, Εκδόσεις Συμμετρία (Αθήνα, 2010).

### 8.5. Εκτέλεση

1. Να αναγνωρισθεί το κύκλωμα όπως φαίνεται στο Σχ. 8.2.



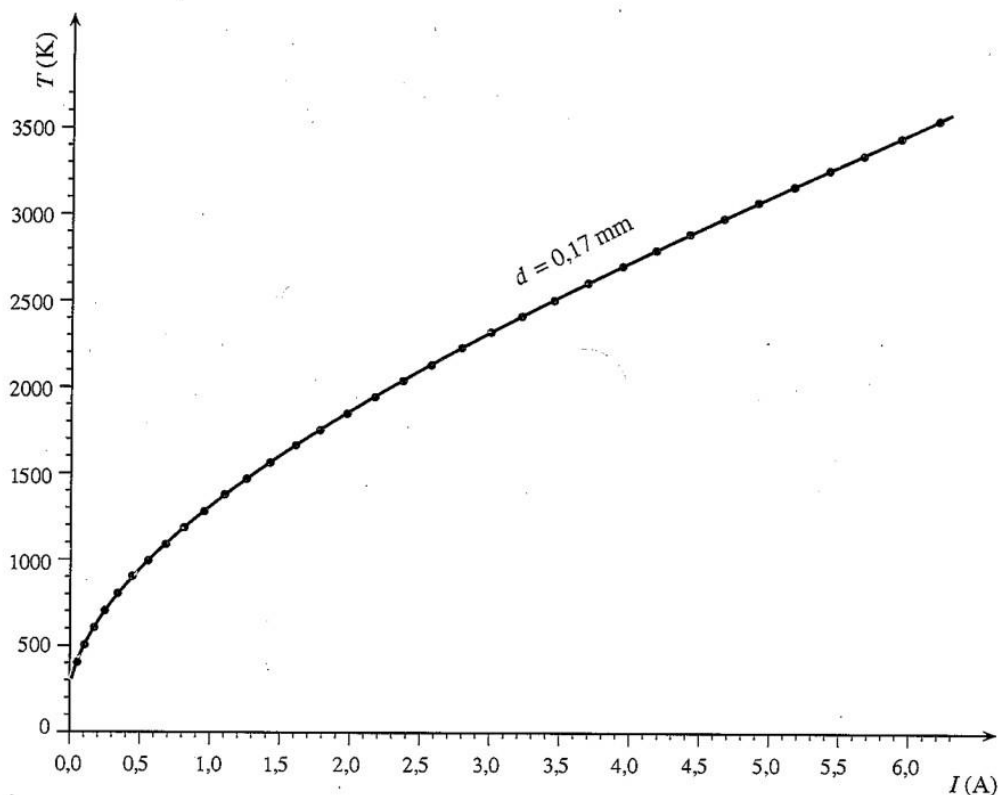
Σχήμα 8.2

2. Μεταβάλλοντας την τιμή της ρυθμιζόμενης αντίστασης  $R'$ , μεταβάλλετε το ρεύμα,  $I$ , που διαρρέει τη λυχνία βολφραμίου και ταυτόχρονα μετρήστε τη διαφορά δυναμικού,  $V$ , στα άκρα της. Επαναλάβετε αυτή τη μέτρηση για δέκα τουλάχιστον τιμές του  $I$ , μεταξύ 0 και 4A. Καταχωρήστε τις μετρήσεις σας στον Πίνακα I.

**Πίνακας Ι**

$V$ (Volt)	$I$ (A)	$R$ ( $\Omega$ )	$T$ (K)	$\theta$ ( $^{\circ}C$ )

3. Ρυθμίστε την αντίσταση, ώστε να περάσει από τη λυχνία το ρεύμα που θα ανεβάσει τη θερμοκρασία του νήματος στους 1500 K, όπως αυτό προκύπτει από το διάγραμμα  $T = f(I)$  του Σχ. 8.3.



**Σχήμα 8.3.** Η θερμοκρασία  $T$  (σε βαθμούς Kelvin) του νήματος βολφραμίου ως συνάρτηση του ρεύματος  $I$  που το διαρρέει. Η διάμετρος του νήματος είναι  $d = 0,17$  mm.

4. Καταχωρήστε την τιμή του ρεύματος και της τάσης στα άκρα της λυχνίας στον Πίνακα ΙΙ.

**Πίνακας ΙΙ**

$T$ (K)	$V$ (V)	$I$ (A)	$P = IU$ (W)
1500			
2000			
2500			

5. Επαναλάβετε τη διαδικασία για  $T = 2000$  K και  $T = 2500$  K.

6. Παρατηρήστε πώς μεταβάλλεται η ισχύς που ακτινοβολείται στο περιβάλλον από το νήμα της λυχνίας στις παραπάνω θερμοκρασίες και καταγράψτε τις παρατηρήσεις σας.

### 8.6. Επεξεργασία των μετρήσεων

1. Για κάθε ζεύγος τιμών  $V$  και  $I$  που μετρήσατε, υπολογίστε την αντίσταση,  $R$ , της λυχνίας και καταχωρήστε τα αποτελέσματα στον πίνακα I.
2. Σχεδιάστε την καμπύλη της διαφοράς δυναμικού,  $V$ , ως συνάρτηση του ρεύματος  $I$ .
3. Για τις τιμές του ρεύματος,  $I$ , της λυχνίας και από την καμπύλη του Σχ. 8.3, που δίνει τη θερμοκρασία του νήματος συναρτήσει του ρεύματος, βρείτε τις αντίστοιχες τιμές της θερμοκρασίας,  $T$ , (σε βαθμούς Kelvin, K) και  $\theta$  (σε  $^{\circ}\text{C}$ ), ( $\theta = T - 273$ ). Καταχωρήστε τις τιμές αυτές στον Πίνακα I.
4. Σχεδιάστε την καμπύλη της αντίστασης,  $R$ , της λυχνίας, ως συνάρτηση της θερμοκρασίας του νήματος,  $\theta$ .
5. Από την κλίση της καμπύλης  $R(\theta)$  βρείτε τον θερμικό συντελεστή αντίστασης,  $\alpha$ , του βολφραμίου σε οποιαδήποτε θερμοκρασία μεταξύ  $1500^{\circ}\text{C}$  και  $2000^{\circ}\text{C}$ . Για τη λυχνία που χρησιμοποιήθηκε, δίνεται ότι  $R_0 = 0,25 \Omega$ . Συγκρίνετε τα αποτελέσματά σας με την τιμή του  $\alpha$  μεταξύ  $0^{\circ}\text{C}$  και  $100^{\circ}\text{C}$ , που είναι  $3,92 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}^{-1}$ .
6. Από τις μετρήσεις  $V$  και  $I$ , που έχετε καταχωρήσει στον Πίνακα II, βρείτε την προσφερόμενη στη λυχνία ηλεκτρική ισχύ, η οποία και ακτινοβολείται στο περιβάλλον.
7. Συγκρίνατε, ποιοτικά, τις πειραματικές τιμές της ακτινοβολούμενης ισχύος, όπως προκύπτουν από τον Πίνακα II, με την ισχύ που προβλέπεται να ακτινοβολεί το νήμα της λυχνίας στις αντίστοιχες θερμοκρασίες, σύμφωνα με το Σχ. 8.1.
8. Συμφωνούν τα αποτελέσματά σας με τις παρατηρήσεις που κάνατε στην ερώτηση 3 της Παραγρ. 8.5, σχετικά με την μεταβολή της ακτινοβολούμενης ισχύος του νήματος συναρτήσει της θερμοκρασίας του;