

# 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.

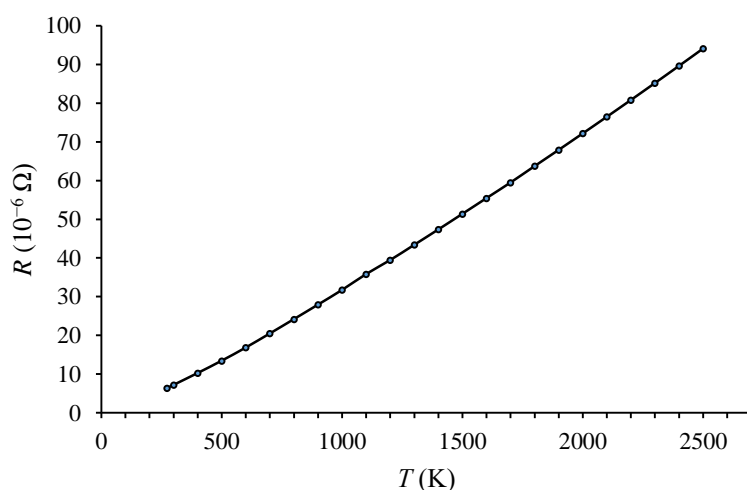
Παράλληλα, δίνεται η δυνατότητα στον σπουδαστή να μελετήσει ποιοτικά το φαινόμενο της ισχύος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ένα θερμό στερεό σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του.

### 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 θερμοκρασιακή εξάρτηση των γεωμετρικών στοιχείων του αγωγού, αλλά κυρίως η θερμοκρασιακή εξάρτηση της ειδικής αντίστασης, έχουν ως αποτέλεσμα η αντίσταση ενός αγωγού να εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

Γενικά, η σχέση που συνδέει την αντίσταση με τη θερμοκρασία δεν είναι γραμμική, όπως φαίνεται στο Σχ. 8.1, όπου απεικονίζεται η αντίσταση του βολφραμίου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας.



**Σχήμα 8.1.** Η αντίσταση του βολφραμίου ως συνάρτηση της θερμοκρασίας για ένα τμήμα, μήκους 1 cm, μιας απείρου μήκους ράβδου διαμέτρου 1 cm.

Το βολφράμιο είναι το πιο πυρίμαχο μέταλλο (θερμοκρασία τήξης 3422 °C ή 3695 K) και για τον λόγο αυτό βρίσκει ευρεία εφαρμογή στην επιστημονική έρευνα και σε διάφορες συσκευές υψηλής τεχνολογίας. Επίσης, υπό κανονικές συνθήκες, είναι ανοξειδωτο, καθώς η οξείδωσή του αρχίζει σε θερμοκρασίες άνω των 400 °C. Ωστόσο, έχει και ένα αδύνατο σημείο,

δηλαδή την έντονη εξάρτηση της αντίστασής του από τη θερμοκρασία, που όμως μπορεί να φανεί χρήσιμο σε ορισμένες εφαρμογές. Για παράδειγμα, έστω ότι θέλουμε να θέσουμε σε λειτουργία μια λυχνία πυρακτώσεως μεγάλης ισχύος, λόγου χάρη 880 W, που όταν είναι θερμή ( $\approx 2500$  K) διαρρέεται από ρεύμα 4 A ( $220$  V  $\times$  4 A = 880 W). Στο Σχ. 8.1 βλέπουμε ότι στο θερμοκρασιακό διάστημα 273–2500 K η αντίσταση του βολφραμίου μεταβάλλεται περίπου 15 φορές! Κατά συνέπεια, στην αρχή, όταν η λυχνία είναι ψυχρή, η αντίσταση του νήματός της είναι 15 φορές μικρότερη, επομένως, με το άνοιγμα του διακόπτη, το αρχικό ρεύμα στη λυχνία είναι 15 φορές μεγαλύτερο ή περίπου 60 A! Το ρεύμα αυτό θα «ρίξει» αμέσως το ρελέ στον ηλεκτρολογικό πίνακα, που συνήθως είναι των 16 A, εξηγώντας έτσι γιατί ορισμένες φορές αδυνατούμε να θέσουμε σε λειτουργία μια τέτοια λυχνία.

Από το Σχ. 8.1 διαπιστώνουμε ότι για μικρές θερμοκρασιακές μεταβολές, ή για υψηλές θερμοκρασίες, η εξάρτηση της αντίστασης από τη θερμοκρασία μπορεί να αποδοθεί, με ικανοποιητική προσέγγιση, από μια γραμμική σχέση της μορφής:

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

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 σε θερμοκρασία δωματίου είναι περίπου  $4,2 \times 10^{-3}$  (°C)<sup>-1</sup>.

Μπορούμε να προσδιορίσουμε εύκολα την αντίσταση ενός αγωγού με τον ορισμό  $R = U/I$ , μετρώντας την τάση  $U$  στα άκρα του και το ρεύμα  $I$  που τον διαρρέει. Επειδή η αντίσταση μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία, η καμπύλη της  $U$  συναρτήσεως του  $I$  δεν είναι ευθεία, αλλά καμπύλη με τα κοίλα προς τα πάνω ή κάτω ανάλογα με τον αν η αντίσταση, αντίστοιχα, αυξάνεται ή ελαττώνεται με τη θερμοκρασία.

Στην πραγματικότητα, ή όταν ζητείται καλύτερη προσομοίωση των πειραματικών δεδομένων, 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 μια σταθερά αλλά εξαρτάται από τη θερμοκρασία.

### 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 νήμα βολφραμίου στις λυχνίες πυρακτώσεως.

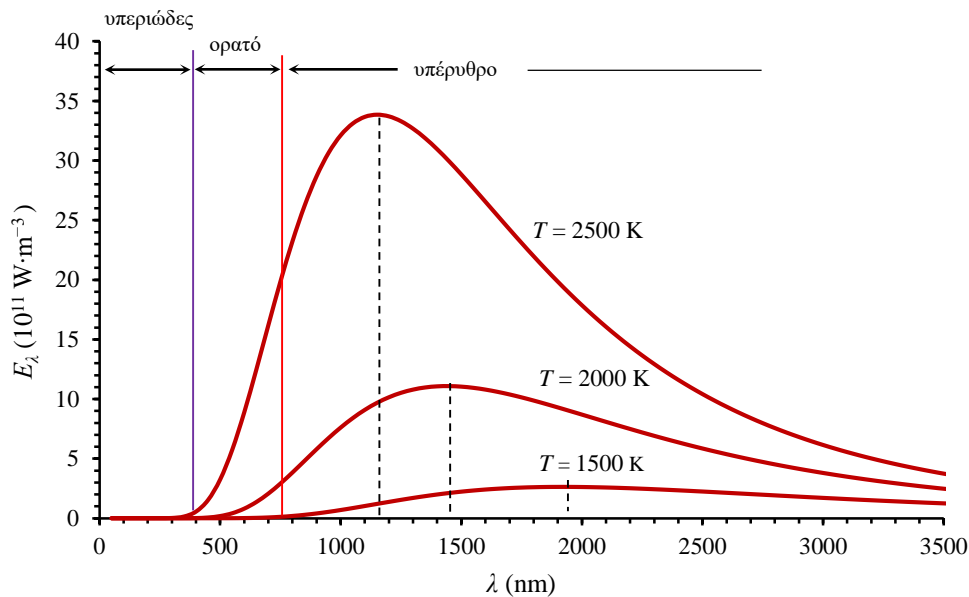
Οι νόμοι της ακτινοβολίας εμπεριέχονται στη σχέση που έδωσε ο Planck για το μέλαν σώμα, που έχει τη μορφή:

$$E_{\lambda} = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda k T} - 1} \quad (8.3)$$

όπου  $c$  είναι η ταχύτητα του φωτός,  $k$  η σταθερά του Boltzmann,  $h$  η σταθερά του Planck,  $\lambda$  το μήκος κύματος και  $E_{\lambda}$  η φασματική κατανομή 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, στο Σχ. 8.2 δίνεται η γραφική της απεικόνιση.



**Σχήμα 8.2.** Η φασματική κατανομή αφετικής ικανότητας σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες.

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. 8.2 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 της οποίας φαίνεται στο Σχ. 8.4.

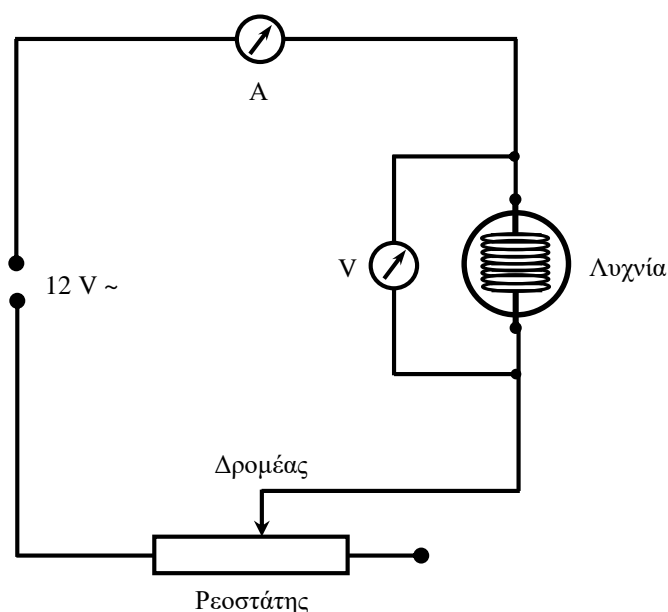
Η αντίσταση του σύρματος στις διάφορες θερμοκρασίες προσδιορίζεται με τον ορισμό  $R = U/I$ .

Έτσι, με τη χρήση μιας λυχνίας βολφραμίου είναι εύκολο πειραματικά να προσδιοριστεί η αντίσταση του νήματός της για θερμοκρασίες από εκείνη του περιβάλλοντος ως τους 2500 °C.

### 8.4. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη (Σχ. 8.3) περιλαμβάνει:

- Μία πηγή εναλλασσόμενης τάσης 12V.
- Μία λυχνία με νήμα από βολφράμιο.
- Μία ρυθμιζόμενη αντίσταση (ρεοστάτης).
- Ένα βολτόμετρο (V)
- Ένα αμπερόμετρο (A).



Σχήμα 8.3. Η πειραματική διάταξη της άσκησης.

### Βιβλιογραφία

1. E. M. Purcell, *Ηλεκτρισμός και Μαγνητισμός (Μαθήματα Φυσικής Berkeley, Τόμος 2)*, (Αθήνα, 1995), Κεφ. 4.
2. H. D. Young, R. A. Freedman, *Πανεπιστημιακή Φυσική με Σύγχρονη Φυσική, Τόμος Β΄: Ηλεκτρομαγνητισμός – Οπτική – Σύγχρονη Φυσική* (Αθήνα, 2022), 25.1-25.3, 26.3, 39,5.
3. R. A. Serway, J. W. Jewett, *Φυσική για επιστήμονες και μηχανικούς: Ηλεκτρισμός και μαγνητισμός – Φως και οπτική – Σύγχρονη φυσική* (Αθήνα, 2013), Η5.1-Η5.4, Σ2.1.
4. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Φυσική: Βασικές αρχές, Τόμος Β΄: Ηλεκτρομαγνητισμός – Οπτική – Σύγχρονη Φυσική* (Αθήνα, 2021), 26.1-26.4, 38.4.
5. ΕΜΠ, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής, Τόμος Ι* (Αθήνα, 2010), σ. 125-132.

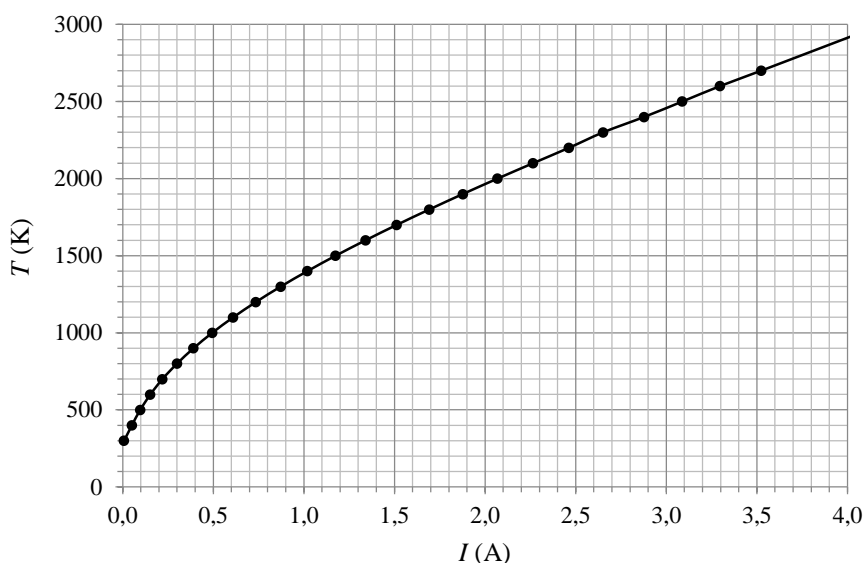
### 8.5. Εκτέλεση

1. Να αναγνωρισθεί το κύκλωμα που φαίνεται στο Σχ. 8.2.
2. Μεταβάλλοντας την αντίσταση του ρεοστάτη με τον δρομέα, μεταβάλλετε το ρεύμα  $I$  που διαρρέει τη λυχνία βολφραμίου. Σημειώστε την τιμή του ρεύματος  $I$  και ταυτόχρονα της τάσης,  $U$ , στα άκρα της. Επαναλάβετε αυτή τη μέτρηση για δέκα τουλάχιστον τιμές του  $I$ , μεταξύ 1 και 4 A, και καταχωρήστε τις μετρήσεις σας στον Πίνακα Ι.

Πίνακας Ι

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

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 του Σχ. 8.4.



**Σχήμα 8.4.** Η θερμοκρασία,  $T$ , του νήματος βολφραμίου ως συνάρτηση του ρεύματος  $I$  που το διαρρέει. Η διάμετρος του νήματος είναι  $d = 0,016$  mm.

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

**Πίνακας II**

$T$ (K)	$U$ (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. Σχεδιάστε την καμπύλη της τάσης  $U$  στα άκρα της λυχνίας ως συνάρτηση του ρεύματος  $I$ . Τι παρατηρείτε;

2. Για κάθε ζεύγος τιμών  $U$  και  $I$  που μετρήσατε, υπολογίστε την αντίσταση  $R$  της λυχνίας και καταχωρήστε τα αποτελέσματα στον Πίνακα I.

3. Για τις τιμές του ρεύματος  $I$  της λυχνίας και από την καμπύλη του Σχ. 8.4 βρείτε τις αντίστοιχες τιμές της θερμοκρασίας  $T$  (σε βαθμούς kelvin, K) και  $\theta$  (σε °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. Αφού πρώτα υπολογίσετε την κλίση της καμπύλης  $R(\theta)$ , βρείτε τον θερμικό συντελεστή αντίστασης  $\alpha$  του βολφραμίου για θερμοκρασίες μεταξύ 1500 °C και 2000 °C. Για τη λυχνία που χρησιμοποιήθηκε δίνεται ότι  $R_0 = 0,25 \Omega$ . Συγκρίνετε τα αποτελέσματά σας με την τιμή του  $\alpha$  που δίνεται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
6. Από τις μετρήσεις  $U$  και  $I$  που έχετε καταχωρήσει στον Πίνακα II, βρείτε την προσφερόμενη στη λυχνία ηλεκτρική ισχύ, η οποία και ακτινοβολείται στο περιβάλλον.
7. Συγκρίνετε, 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. 8.2. Συμφωνούν τα αποτελέσματά σας με τις παρατηρήσεις που κάνατε;