

# Άσκηση 32

## Βαθμονόμηση θερμοζεύγους

### 32.1 Σκοπός

Σκοπός της άσκησης είναι η μελέτη του θερμοηλεκτρικού φαινομένου, καθώς και η βαθμονόμηση ενός θερμοζεύγους τύπου Chromel-Constantan.

### 32.2 Θεωρία

#### 32.2.1. Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο – Εισαγωγή

Το **θερμοηλεκτρικό φαινόμενο** είναι η απευθείας μετατροπή μιας διαφοράς θερμοκρασίας σε ηλεκτρικό δυναμικό, καθώς και το αντίστροφο φαινόμενο. Πιο συγκεκριμένα, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο άκρων ενός αγωγού έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο αυτών άκρων (και επομένως διέλευση ρεύματος, **Φαινόμενο Seebeck**) και, αντιστρόφως, η διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από την επαφή δύο διαφορετικών αγωγών προκαλεί ψύξη ή θέρμανση της επαφής, ανάλογα με τη φορά του ρεύματος (**Φαινόμενο Peltier**).

Διατάξεις που βασίζονται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρισμού με τη μετατροπή θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια, για την ψύξη ή τη θέρμανση συσκευών, καθώς και για μέτρηση, ρύθμιση ή έλεγχο της θερμοκρασίας. Η εφαρμογή του θερμοηλεκτρικού φαινομένου που θα μελετηθεί στην Άσκηση αυτή είναι το **θερμοστοιχείο ή θερμοζεύγος**.

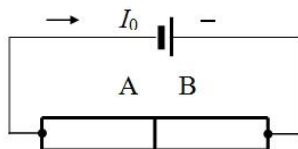
#### 32.2.2. Το φαινόμενο Peltier

Το 1834, ο Γάλλος Φυσικός J. C. Peltier παρατήρησε ότι, όταν ένα ρεύμα,  $I_0$ , διαρρέει την επαφή δύο διαφορετικών αγωγών, εκτός από τη γνωστή θερμότητα Joule που εκλύεται μέσα στον όγκο των αγωγών λόγω της αντίστασής τους, εκλύεται ή απορροφάται, ανάλογα με τη φορά του ρεύματος, μια πρόσθετη ποσότητα θερμότητας (Σχ. 32.1α). Η πειραματική μελέτη του φαινομένου έδειξε ότι η πρόσθετη θερμότητα (θερμότητα Peltier),  $Q_P$ , είναι ανάλογη προς το φορτίο που διασχίζει την επαφή, είναι δηλαδή ανάλογη προς την πρώτη δύναμη του  $I_0$  και όχι προς το τετράγωνό του, σε αντίθεση με τη θερμότητα Joule. Έχουμε δηλαδή

$$Q_P = K_P I_0 t, \quad (32.1)$$

όπου  $t$  είναι η χρονική διάρκεια διέλευσης του ρεύματος και  $K_P$  ο συντελεστής Peltier. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από τα μέταλλα που βρίσκονται σε επαφή και από τη θερμοκρασία τους. Επιπλέον, ενώ η θερμότητα Joule δεν εξαρτάται από τη φορά του ρεύματος, η θερμότητα Peltier εκλύεται, θερμαίνοντας επομένως την επαφή, όταν το ρεύμα ρέει προς τη μία κατεύθυνση (π.χ. από το μέταλλο Β προς το μέταλλο Α, Σχ. 32.1) και

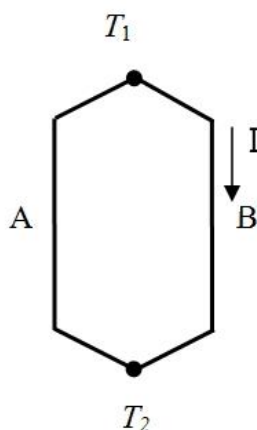
απορροφάται, ψύχοντας την επαφή, όταν το ρεύμα ρέει προς την αντίθετη κατεύθυνση. Από την Εξ. (32.1) προκύπτει ότι η μονάδα του συντελεστή Peltier είναι το Volt. Για τα περισσότερα ζεύγη μετάλλων, η τιμή αυτού του συντελεστή είναι πολύ χαμηλή, της τάξης του  $10^{-2} - 10^{-3}$  V, και για το λόγο αυτό η θερμότητα Peltier πολύ δύσκολα διαχωρίζεται από τη θερμότητα Joule.



**Σχήμα 32.1.** Όταν η επαφή δύο διαφορετικών αγωγών, A και B, διαρρέεται από ρεύμα, η επαφή αυτή ψύχεται ή θερμαίνεται ανάλογα με τη φορά του ρεύματος.

### 32.2.3. Το φαινόμενο Seebeck - Θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη

Το 1821, ο Πρώσος Φυσικός T. J. Seebeck διαπίστωσε ότι ένα κύκλωμα που αποτελείται από δύο διαφορετικά μέταλλα, οι επαφές των οποίων διατηρούνται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Η τιμή αυτού του ρεύματος είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των δύο επαφών και εξαρτάται από τον τύπο των μετάλλων που βρίσκονται σε επαφή. Είναι προφανές ότι, για να διαρρέεται το κύκλωμα από ρεύμα, θα πρέπει να έχει δημιουργηθεί μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο επαφές όταν οι θερμοκρασίες τους δεν είναι ίσες. Το φαινόμενο αυτό, που ονομάστηκε **φαινόμενο Seebeck** είναι, όπως αντιλαμβανόμαστε, το αντίστροφο του φαινομένου Peltier.



**Σχήμα 32.2.** Όταν οι επαφές δύο διαφορετικών αγωγών, A και B, βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, το κύκλωμα των αγωγών αυτών διαρρέεται από ρεύμα,  $I$ , η τιμή του οποίου εξαρτάται από τη διαφορά μεταξύ των δύο θερμοκρασιών  $T_1$  και  $T_2$ . Εδώ  $T_1 > T_2$ .

Μια σχηματική παράσταση του φαινομένου Seebeck δίνεται στο Σχ. 32.2, το οποίο εικονίζει ένα κλειστό κύκλωμα αποτελούμενο από δύο διαφορετικά μέταλλα, A και B, οι επαφές των οποίων διατηρούνται σε θερμοκρασίες  $T_1$  και  $T_2$ . Λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας  $T_1 - T_2$ ,

το κύκλωμα διαρρέεται από ρεύμα. Η διαφορά δυναμικού,  $U$ , στην οποία οφείλεται αυτό το ρεύμα, η οποία αποκαλείται και θερμο-ηλεκτρεγερτική δύναμη δίνεται από τη σχέση

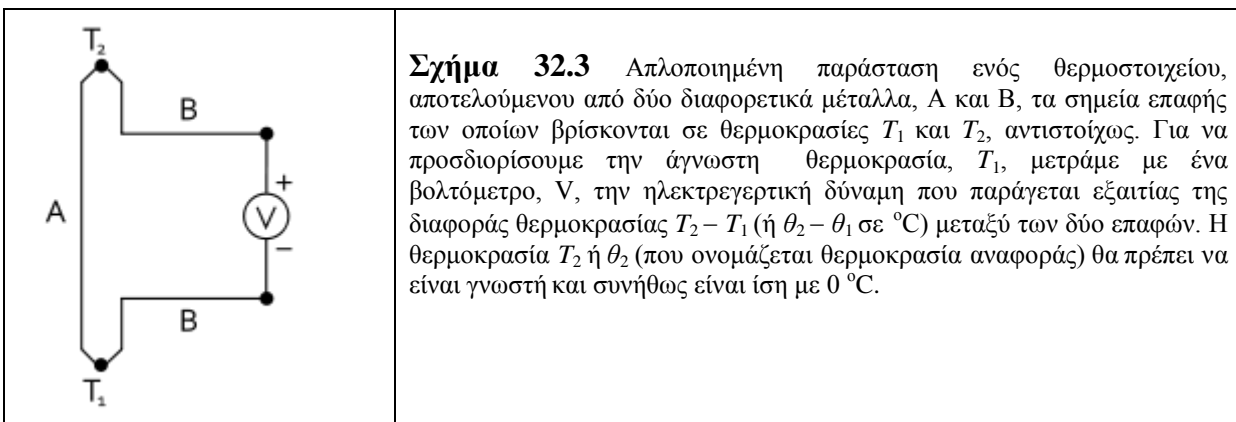
$$U = C(T_1 - T_2) \quad (32.2)$$

όπου  $C$  είναι μία σταθερά που ονομάζεται **σταθερά του ζεύγους** των δύο μετάλλων. Προφανώς η τιμή της  $C$  εξαρτάται από τις χρησιμοποιούμενες μονάδες των  $U$  και  $T$ .

### 32.2.3. Το θερμοστοιχείο

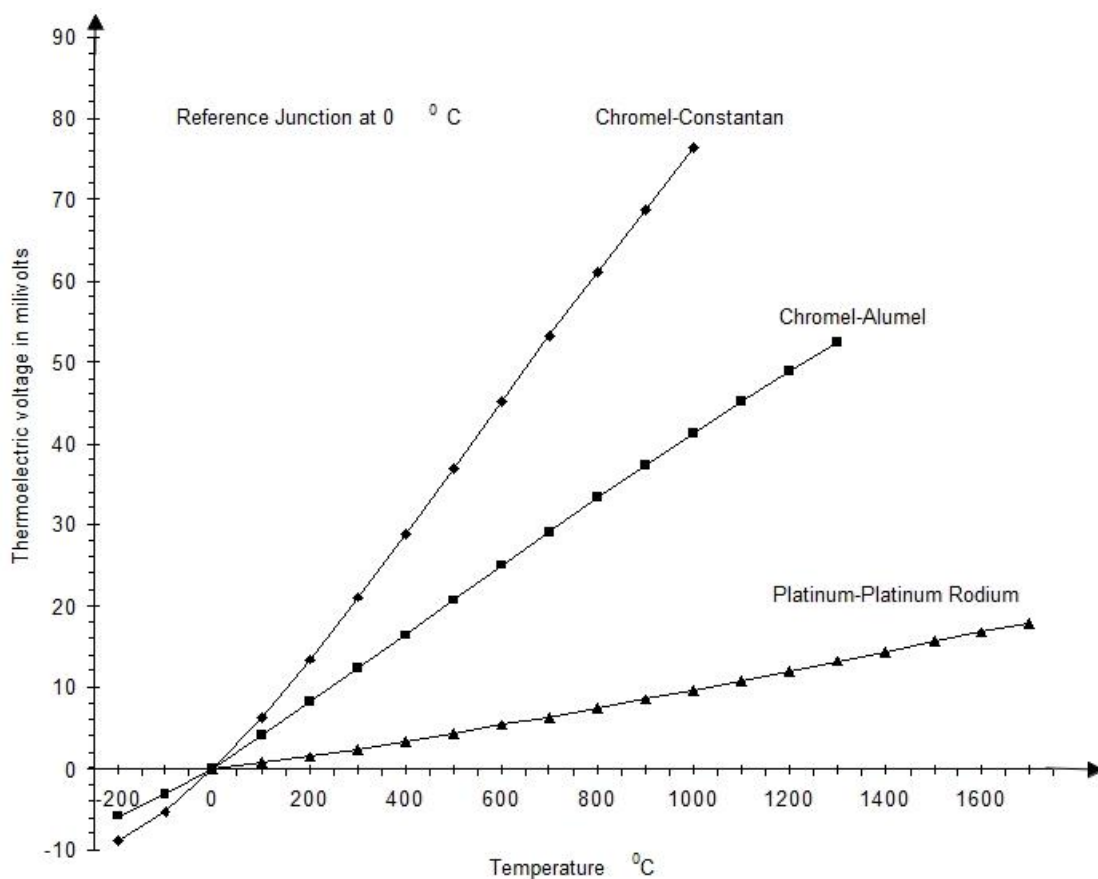
Το **θερμοστοιχείο** ή **θερμοζεύγος**, στην απλούστερή του μορφή, συνίσταται στην επαφή δύο διαφορετικών μετάλλων και χρησιμοποιείται για τη μέτρηση ή τον έλεγχο της θερμοκρασίας. (Σχ. 32.3) Η λειτουργία του βασίζεται στο φαινόμενο Seebeck, τη μετατροπή δηλαδή της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ των επαφών των δύο μετάλλων σε διαφορά ηλεκτρικού δυναμικού. Μετρώντας αυτή τη διαφορά δυναμικού με ένα κατάλληλο βολτόμετρο (V), μπορούμε να προσδιορίσουμε τη διαφορά θερμοκρασίας που τη δημιουργήσει.

Για να προσδιορίσουμε μια άγνωστη απόλυτη θερμοκρασία,  $T_1$ , θα πρέπει η μία από τις δύο επαφές να βρίσκεται στη συγκεκριμένη αυτή θερμοκρασία (**κύρια επαφή**), ενώ η άλλη επαφή (**επαφή αναφοράς**, συνήθως η ψυχρή) να διατηρείται σε μια γνωστή θερμοκρασία αναφοράς,  $T_2$  (π.χ. στους  $0^\circ\text{C}$ ). Σε βαθμούς Κελσίου, συμβολίζουμε συνήθως τη θερμοκρασία με  $\theta$ , αντί για  $T$ .



Τα σύγχρονα επιστημονικά και βιομηχανικά θερμοστοιχεία χρησιμοποιούν ηλεκτρονικές μεθόδους για την αντιστάθμιση της ψυχρής επαφής και τη ρύθμιση των μεταβολών θερμοκρασίας στις επαφές σύνδεσης των ηλεκτροδίων, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη ευκολία στη χρήση τους και την αύξηση της ακριβείας τους.

Σήμερα, τα θερμοζεύγη καλύπτουν ένα εύρος θερμοκρασιών που εκτείνεται από 2 έως 3000 K και, επειδή έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή, είναι πολύ πιο βολικά στη χρήση τους από τα αντίστοιχα γυάλινα και εύθραυστα θερμομόμετρα υδραργύρου, για τη μέτρηση και τον έλεγχο θερμοκρασιών στην επιστήμη και τη βιομηχανία.



**Σχήμα 32.4.** Καμπύλες βαθμονόμησης τριών διαφορετικών θερμοζευγών.  $U$  είναι η διαφορά δυναμικού (ή θερμο-ηλεκτρεγερτική δύναμη) ανάμεσα στις δύο επαφές του θερμοζεύγους, όταν η επαφή αναφοράς είναι στους  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  και η άλλη στη θερμοκρασία  $\theta$ . Παρατηρούμε ότι οι καμπύλες συμπεριφέρονται σχεδόν γραμμικά στην περιοχή θερμοκρασιών  $0 - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### 32.2.4. Χαρακτηριστικές καμπύλες μερικών θερμοζευγών

Στο Σχ. 32.4 δίνονται οι τιμές της ηλεκτρεγερτικής δύναμης για μερικά θερμοζεύγη που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην επιστημονική έρευνα αλλά και στις εφαρμογές. Το πρωτόκολλο καταγραφής των καμπυλών αυτών είναι αυτό των δύο θερμοζευγών, όπου η θερμοκρασία της επαφής αναφοράς (Reference Junction) είναι  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Στις καμπύλες αυτές η θερμο-ηλεκτρεγερτική δύναμη,  $U$ , δίνεται σε mV ενώ η θερμοκρασία,  $\theta$ , σε  $^{\circ}\text{C}$ . Όπως βλέπουμε, παρ' όλο που οι καμπύλες δεν είναι απολύτως γραμμικές σε ολόκληρη την περιοχή θερμοκρασιών, σε σχετικά μικρή περιοχή θερμοκρασιών η γραμμικότητα είναι ικανοποιητική. Επομένως ο συντελεστής  $C$  στην Εξ. (32.2) μπορεί να θεωρηθεί σταθερός.

### 32.3 Μέθοδος

Η βαθμονόμηση ενός θερμοζεύγους ή η μέτρηση του συντελεστή αναλογίας,  $C$ , στην Εξ. (32.2) συνίσταται στην ανεύρεση της σχέσης μεταξύ των ενδείξεων,  $U$ , του βολτομέτρου και των ενδείξεων της θερμοκρασίας,  $\theta$ , ενός αξιόπιστου θερμομέτρου. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το σύστημα των δύο επαφών, της κύριας και της επαφής αναφοράς. Συνήθως, η επαφή αναφοράς βρίσκεται μέσα σε ένα δοχείο με πάγο, ( $\theta_2 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), ενώ η κύρια επαφή βυθίζεται μέσα σε ένα σώμα (υγρό ή στερεό), η θερμοκρασία,  $\theta_1$ , του οποίου ελέγχεται και μετράται με ένα αξιόπιστο θερμομόμετρο.

Στην Άσκηση αυτή ξεφεύγουμε από το αυστηρό πρωτόκολλο, αντικαθιστώντας το δοχείο των  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  με έναν μεταλλικό κύλινδρο μεγάλης θερμικής αδράνειας, που βρίσκεται σε

θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό είναι επιτρεπτό, όταν επιθυμεί κανείς να βαθμονομήσει το θερμοζεύγος σε μια στενή περιοχή θερμοκρασιών ( $20 - 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ), γειτονική του  $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Πράγματι, αν εξετάσει κανείς προσεκτικά τις καμπύλες στο Σχ. 32.4, θα διαπιστώσει ότι οι κλίσεις τους στα θερμοκρασιακά διαστήματα  $0 - 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$  και  $20 - 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$  είναι, στην πράξη, ίσες. Συνεπώς, η βαθμονόμηση του θερμοζεύγους μπορεί να γίνει και όταν η επαφή αναφοράς βρίσκεται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ η κύρια επαφή είναι θερμότερη κατά  $\Delta\theta$ . Έτσι, στην Άσκηση αυτή, η βαθμονόμηση του θερμοζεύγους γίνεται με τη μέτρηση της τάσης,  $U$ , ως συνάρτησης της διαφοράς  $\Delta\theta = \theta - \theta_{\text{περ}}$ . Από την κλίση της πειραματικής καμπύλης  $U = f(\Delta\theta)$ , μπορούμε να υπολογίσουμε τη σταθερά αναλογίας,  $C$ , της Εξ. (32.2) και, επομένως να βαθμονομήσουμε το θερμοζεύγος μας.

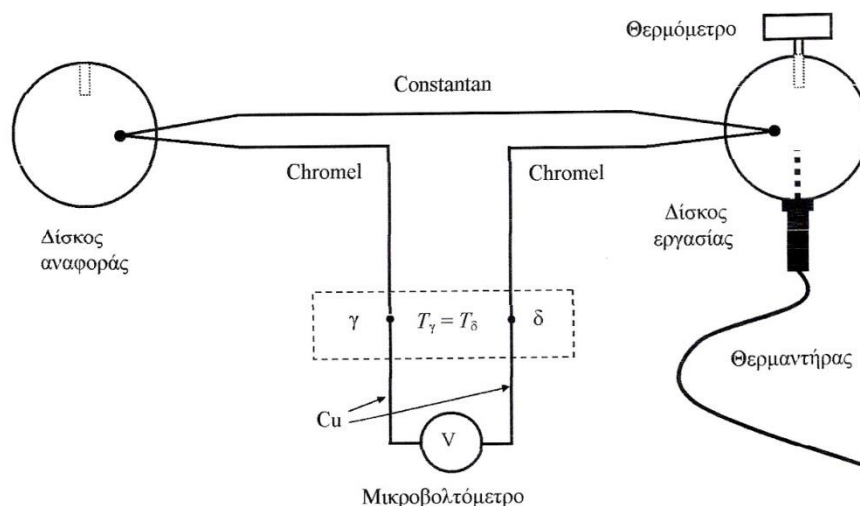
Για να αποφευχθεί η δημιουργία παρασιτικών τάσεων, εξαιτίας των σημείων σύνδεσης ( $\gamma$  και  $\delta$  Σχ. 32.5) του θερμοζεύγους με τα ηλεκτρόδια από χαλκό (Cu), θα πρέπει τα δύο αυτά σημεία να βρίσκονται στην ίδια ακριβώς θερμοκρασία, θα πρέπει δηλαδή να διασφαλίζεται ότι  $\theta_{\gamma} = \theta_{\delta}$ . Με τον τρόπο αυτό, τα παρασιτικά θερμοζεύγη παράγουν ίσες και αντίθετες τάσεις, που αλληλοαναιρούνται πλήρως.

Να προσθέσουμε ακόμη ότι τις θερμοκρασίες  $\theta$  και  $\theta_{\text{περ}}$  είναι προτιμότερο να τις μετρά κανείς με το ίδιο θερμόμετρο και όχι με δύο διαφορετικά, έτσι ώστε να εξαλείφεται το τυχόν συστηματικό σφάλμα του θερμόμετρου.

### 32.4 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει (Σχ. 32.5):

- Δύο μεταλλικούς κυλίνδρους (δίσκους) με μεγάλη θερμική αδράνεια, που στηρίζονται σε βάσεις από τεφλόν. Η θερμική αδράνεια αποτρέπει τις ακανόνιστες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, που μπορούν να προκληθούν από τυχαίους παράγοντες, όπως η κίνηση του αέρα κ.λ.π. Ο ένας κύλινδρος ονομάζεται **κύριος δίσκος**, ή δίσκος εργασίας και θερμαίνεται έως τους  $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , ενώ ο άλλος, που είναι ο **δίσκος αναφοράς**, παραμένει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Δύο θερμοζεύγη τύπου Chromel-Constantan (Chromel: 90% Ni - 20% Cr και Constantan: 55% Cu - 45% Ni) τα οποία βρίσκονται σε καλή θερμική επαφή με τους μεταλλικούς κυλίνδρους, η θερμοκρασία των οποίων μπορεί να μετρηθεί με ένα αξιόπιστο ψηφιακό θερμόμετρο. Η καλή θερμική επαφή των θερμοζευγών με τους μεταλλικούς κυλίνδρους εξασφαλίζεται με τη χρησιμοποίηση κατάλληλης εποξειδικής κόλλας για τη συγκόλλησή τους.
- Ένα ψηφιακό θερμόμετρο, που μετρά σε βαθμούς Κελσίου ( $^{\circ}\text{C}$ ) με διακριτική ικανότητα  $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Το σφάλμα του οργάνου αυτού δεν υπερβαίνει τους  $0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- Ένα ζευγάρι ορειχάλκινων πλακιδίων, μεταξύ των οποίων βρίσκονται οι επαφές σύνδεσης του βολτόμετρου με τα θερμοζεύγη, ανάμεσα σε δύο φύλλα μίκας, υπό μεγάλη πίεση. Η αποστολή αυτής της κατασκευής είναι να διασφαλίζει τη συνθήκη  $T_{\gamma} = T_{\delta}$ . Η μίκα είναι μονωτής και αποτρέπει το ανεπιθύμητο βραχυκύκλωμα μεταξύ των δύο σημείων σύνδεσης.



**Σχήμα 32.5** Σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιείται για τη βαθμονόμηση του θερμοζεύγους Chromel-Constantan. Το μικροβολτόμετρο μετράει τη διαφορά δυναμικού που δημιουργείται εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ δίσκου εργασίας και δίσκου αναφοράς. Ο δίσκος εργασίας θερμαίνεται με τη βοήθεια μιας μικρής θερμαινόμενης ράβδου (ηλεκτρικού θερμαντήρα), ενώ ο δίσκος αναφοράς διατηρείται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι επαφές σύνδεσης  $\gamma$  και  $\delta$  βρίσκονται συμπιεσμένες ανάμεσα σε δύο φύλλα μίκας, ώστε να διατηρούνται στην ίδια θερμοκρασία, χωρίς όμως να βραχυκυκλώνονται. Το ίδιο θερμόμετρο μεταφέρεται από τον ένα κύλινδρο στον άλλο, ώστε να εξαλειφεται το συστηματικό σφάλμα κατά τη μέτρηση των δύο θερμοκρασιών.

- Έναν ηλεκτρικό θερμαντήρα 20 W, υπό μορφή λεπτής θερμαινόμενης ράβδου, διαμέτρου 3,5 mm, η οποία εισάγεται μέσα σε μία ειδική υποδοχή του μεταλλικού κυλίνδρου, για τη θέρμανσή του.
- Ένα πολύμετρο το οποίο, στην κλίμακα των 200 mV, έχει διακριτική ικανότητα 10  $\mu$ V και μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί ως μικροβολτόμετρο.

### Βιβλιογραφία

1. H.D. Young, *Πανεπιστημιακή Φυσική*, Τόμος Α': *Μηχανική-Θερμοδυναμική* Κεφ. 15: Παράγρ. 15.1 και 15.2, Εκδόσεις Παπαζήση (Αθήνα 1994).
2. Κ.Δ. Αλεξόπουλος, *Γενική Φυσική*, Τόμος Β': *Ηλεκτρισμός*, Παράγρ. 191 – 193, Εκδόσεις Παπαζήση (Αθήνα 1993).

### 32.5. Εκτέλεση

1. Θέστε σε λειτουργία το ψηφιακό πολύμετρο, επιλέξτε την κλίμακα 200 mV DC, και περιμένετε ένα πεντάλεπτο έως ότου σταθεροποιηθούν οι λειτουργίες του. Το ψηφιακό θερμόμετρο εισάγεται σε μια ειδική υποδοχή, που βρίσκεται στο επάνω μέρος των κυλίνδρων.
2. Μετρήστε και σημειώστε τη θερμοκρασία του δίσκου αναφοράς, ο οποίος έχει τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

**ΠΡΟΣΟΧΗ:** Η μέτρηση της θερμοκρασίας αναφοράς επαναλαμβάνεται στους 35, 50, 65, 80 και 90 °C της κύριας επαφής (βλ. ερωτηματικά, ?, στον Πίνακα I).

3. Εισάγετε τον θερμαντήρα στον κύλινδρο που πρόκειται να θερμανθεί και, στη συνέχεια, θέστε σε λειτουργία τον θερμαντήρα.

**ΠΡΟΣΟΧΗ:** ο θερμαντήρας πρέπει να εισάγεται σε όλο του το μήκος για να αποτραπεί η καταστροφή του.

4. Καθώς η θερμοκρασία του κύριου κυλίνδρου αρχίζει αργά να ανεβαίνει, σημειώστε τις τιμές της θερμοκρασίας,  $\theta$ , και τις αντίστοιχες τιμές του μικροβολτόμετρου,  $U$ , συμπληρώνοντας τον Πίνακα I. Η θερμοκρασία του κυλίνδρου δεν πρέπει να υπερβεί τους 90 °C, γιατί στις υψηλότερες θερμοκρασίες υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του θερμόμετρου και της εποξειδικής κόλλας.

5. Σβήστε τον θερμαντήρα και το πολύμετρο.

**Πίνακας I**

$\theta$ (°C)	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$U$ (μV)															
$\theta_{\text{περ}}$ (°C)	?			?			?			?			?		?
$\Delta\theta$ (°C)															

### 32.6 Επεξεργασία των μετρήσεων

1. Από τις τιμές του Πίνακα I, υπολογίστε τις διαφορές  $\Delta\theta = \theta - \theta_{\text{περ}}$ . Σχεδιάστε σε γραφική παράσταση τα πειραματικά σημεία της τάσης,  $U$ , ως συνάρτηση του  $\Delta\theta$  και, από την κλίση της ευθείας, υπολογίστε γραφικά την τιμή της σταθεράς του θερμοζεύγους Chromel-Constantan στο διάστημα 0 – 70 °C και εκτιμήστε το σφάλμα της,  $\delta C$ , σύμφωνα με τη μέθοδο που περιγράφεται στον Τόμο I των «Εργαστηριακών Ασκήσεων Φυσικής» (βλ. Τόμος I, Παράγρ. Α).

2. Είναι γραμμική σε ικανοποιητικό βαθμό η σχέση  $U = f(\Delta\theta)$ ;

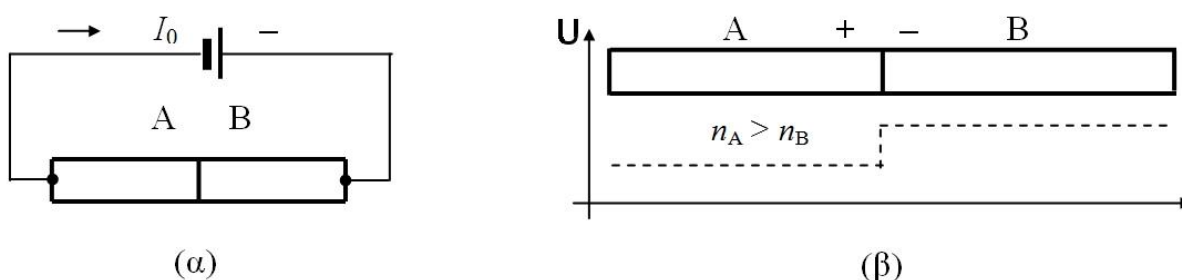
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΑΣΚΗΣΗΣ 32 (Π32)

### Βαθμονόμηση θερμοζεύγους

#### Π32.1 Το φαινόμενο Peltier - Εσωτερικό δυναμικό επαφής δύο μετάλλων

Η εκδήλωση του φαινομένου Peltier υποδεικνύει ότι η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας μεταβάλλεται όταν αυτά διαπερνούν τη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μετάλλων. Πράγματι, αν η κινητική τους ενέργεια αυξάνεται, η αύξηση της ενέργειας μεταφέρεται στο κρυσταλλικό πλέγμα και η επαφή των δύο μετάλλων θερμαίνεται. Αντιθέτως, αν η κινητική τους ενέργειά μειώνεται, η επαφή ψύχεται (Σχ. Π32.1α). Αυτό όμως σημαίνει ότι μεταξύ των δύο μετάλλων υπάρχει μία διαφορά δυναμικού, η οποία δημιουργείται λόγω διαφορών στις φυσικές ιδιότητες των δύο μετάλλων, και ονομάζεται **εσωτερική διαφορά δυναμικού επαφής** ( $U_i$ ).

Στο μοντέλο του αερίου ελευθέρων ηλεκτρονίων της Φυσικής Συμπυκνωμένης Ύλης, η δημιουργία του βήματος δυναμικού (Σχ. Π32.1β) στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μετάλλων αποδίδεται στη διαφορετική πυκνότητα των ηλεκτρονίων στα δύο μέταλλα. Πράγματι, έστω ότι, πριν έρθουν σε επαφή, τα δύο μέταλλα δεν ήταν φορτισμένα και ότι η πυκνότητα των ηλεκτρονίων,  $n_A$ , στο μέταλλο A ήταν μεγαλύτερη από εκείνη του B,  $n_B$ , δηλαδή  $n_A > n_B$ . Τη στιγμή που τα μέταλλα έρχονται σε επαφή, ένα μέρος των ηλεκτρονίων του σώματος A αρχίζει να εισχωρεί στο σώμα B, φορτίζοντας το πρώτο με θετικό και το δεύτερο με αρνητικό φορτίο. Η φόρτιση αυτή δημιουργεί ένα επιβραδυντικό πεδίο, το οποίο θα αυξάνεται έως ότου εξισωθούν οι ροές των ηλεκτρονίων που διασχίζουν τη διαχωριστική επιφάνεια προς τις δύο κατευθύνσεις.



**Σχήμα Π32.1.** (α) Όταν η επαφή δύο διαφορετικών αγωγών, A και B, διαρρέεται από ρεύμα, η επαφή αυτή ψύχεται ή θερμαίνεται ανάλογα με τη φορά του ρεύματος. (β) Όταν η πυκνότητα των ηλεκτρονίων,  $n_A$ , στο μέταλλο A είναι μεγαλύτερη από εκείνη του B,  $n_B$ , η μετάβαση ηλεκτρονίων από το A στο B δημιουργεί μια εσωτερική διαφορά δυναμικού επαφής, που απεικονίζεται με το σκαλοπάτι, στο (εστιγμένο) ενεργειακό διάγραμμα.

Εφόσον η ενεργειακή διαφορά, που οφείλεται στην εσωτερική διαφορά δυναμικού επαφής,  $U_i$ , μεταξύ των δύο μετάλλων είναι  $eU_i$ , σύμφωνα με τη Στατιστική Μηχανική (κατανομή Boltzmann), οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων,  $n_A$  και  $n_B$ , των δύο μετάλλων συνδέονται με τη σχέση:

$$n_A = n_B \exp\left(-\frac{eU_i}{kT}\right) \quad (\text{Π32.1})$$

όπου  $k$  η σταθερά του Boltzmann και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία. Από την τελευταία σχέση προκύπτει ότι η εσωτερική διαφορά δυναμικού επαφής,  $U_i$ , είναι ίση με

$$U_i = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_B}{n_A} \quad (\text{Π32.2})$$



Σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος ο παράγοντας  $kT/e$  είναι περίπου  $2,5 \times 10^{-2}$  V, ενώ ο λογάριθμος του  $n_A/n_B$  ισούται με μερικές μόνο μονάδες. Συνεπώς, από το απλό αυτό μοντέλο προκύπτει ότι η διαφορά δυναμικού που εμφανίζεται στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο μετάλλων είναι της τάξης της πειραματικής τιμής του συντελεστή Peltier. Βλέπουμε επομένως ότι η κλασική περιγραφή της κίνησης των ηλεκτρονίων στους αγωγούς δίνει ικανοποιητική ερμηνεία του φαινομένου και οδηγεί στην Εξ. (32.1), η οποία αποδίδει ικανοποιητικά τόσο την τιμή όσο και την εξάρτηση του εσωτερικού δυναμικού από τη θερμοκρασία.

### Π.32.2. Θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη (Φαινόμενο Seebeck)

Το φαινόμενο πρωτοπαρατηρήθηκε από τον Seebeck (1826) και φέρει το όνομά του. Ο ερευνητής κατέγραψε την εμφάνιση μιας ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε ένα κύκλωμα από σύρματα διαφόρων μετάλλων όταν οι θερμοκρασίες των επαφών τους δεν ήταν ίσες.

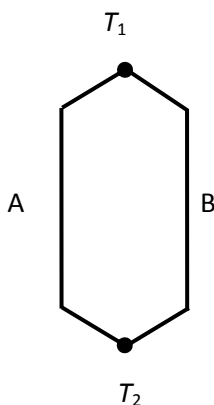
Τους λόγους που προκαλούν την εμφάνιση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης θα τους εξετάσουμε στο ίδιο παράδειγμα των αγωγών A και B, μόνο που τώρα θα υποθέσουμε ότι και τα ελεύθερα τους άκρα βρίσκονται σε επαφή (Σχ. Π32.2). Όπως βλέπουμε, στο κλειστό αυτό κύκλωμα υπάρχουν δύο επαφές που διατηρούνται σε θερμοκρασίες  $T_1$  και  $T_2$  αντίστοιχα. Η εξωτερική διαφορά δυναμικού επαφής μηδενίζεται. Όσο για τα δύο εσωτερικά δυναμικά επαφής  $U_{i1}$  και  $U_{i2}$ , οι τιμές τους εξαρτώνται από τη θερμοκρασία (Εξ. Π32.24) και τα πρόσημά τους είναι αντίθετα. Έτσι, η συνολική ηλεκτρεγερτική δύναμη του κλειστού κυκλώματος είναι μηδέν όταν οι θερμοκρασίες των δύο επαφών είναι ίσες, δηλαδή όταν  $T_1 = T_2$ . Αλλά όταν, για παράδειγμα,  $T_1 > T_2$ , στο κύκλωμα εμφανίζεται μια ηλεκτρεγερτική δύναμη  $U$ , η οποία εξαρτάται από τις θερμοκρασίες των δυο επαφών και το είδος των μετάλλων. Σύμφωνα με το μοντέλο που εξετάσαμε προηγουμένως, η τιμή της είναι

$$U = U_{i1} - U_{i2} = (T_1 - T_2) \frac{k}{e} \ln \frac{n_B}{n_A} \quad (\text{Π32.3})$$

ή

$$U = C(T_1 - T_2), \quad (\text{Π32.4})$$

όπου  $C$  είναι μία σταθερά που ονομάζεται **σταθερά του ζεύγους** των δύο μετάλλων. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει το συμπέρασμα ότι το φαινόμενο Seebeck ή το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο είναι αντίστροφο του φαινομένου Peltier.



Σχήμα Π32.2

Λόγω της μικρής αντίστασης του κλειστού αυτού κυκλώματος, η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη προκαλεί μεγάλα ρεύματα που μπορούν να μετρηθούν σχετικά εύκολα. Το φαινόμενο αμέσως εφαρμόστηκε στη θερμομετρία. Σήμερα, τα θερμοζεύγη καλύπτουν ένα εύρος θερμοκρασιών που εκτείνεται από 2 έως 3000 K. Πρόκειται ουσιαστικά για δύο κολλημένα μεταξύ τους σύρματα, τα ελεύθερα άκρα των οποίων συνδέονται με έναν μετρητή ηλεκτρικής τάσης ή ρεύματος και, καθώς έχουν μεγάλη μηχανική αντοχή, είναι πολύ πιο βολικά στη χρήση τους από τα αντίστοιχα γυάλινα και εύθραυστα θερμομέτρα υδραργύρου.

Πολλά υπόσχεται η εφαρμογή του φαινομένου Seebeck στην άμεση μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Σήμερα, η απόδοση των συσκευών αυτών είναι 15 %, δηλαδή είναι μόνο δύο φορές μικρότερη από το γνωστό και πολυδάπανο κύκλο: θερμική ενέργεια-ατμός-μηχανική ενέργεια-ηλεκτρική ενέργεια των ατμοηλεκτρικών γεννητριών.