

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. Γενικά

32.2.1. Το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο – Εισαγωγή

Το **θερμοηλεκτρικό φαινόμενο** είναι η απευθείας μετατροπή μιας διαφοράς θερμοκρασίας σε ηλεκτρικό δυναμικό, καθώς και το αντίστροφο. Πιο συγκεκριμένα, η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των δύο άκρων ενός αγωγού έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δύο αυτών άκρων (**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 – Εσωτερικό δυναμικό επαφής δύο μετάλλων

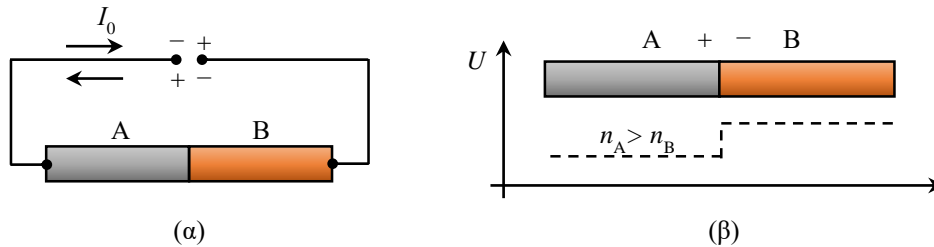
Το 1834, ο γάλλος φυσικός J. C. A. Peltier παρατήρησε ότι, όταν ένα ρεύμα I_0 διαρρέει την επαφή δύο διαφορετικών αγωγών, εκτός από τη γνωστή θερμότητα Joule που εκλύεται μέσα στον όγκο των αγωγών, λόγω της αντίστασής τους, εκλύεται ή απορροφάται, ανάλογα με τη φορά του ρεύματος, μια πρόσθετη ποσότητα θερμότητας (Σχ. 32.1.α). Η πειραματική μελέτη του φαινομένου έδειξε ότι η πρόσθετη θερμότητα (θερμότητα Peltier) Q_p είναι ανάλογη του φορτίου που διασχίζει την επαφή, είναι δηλαδή ανάλογη της πρώτης δύναμης του I_0 και όχι του τετραγώνου 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 στο 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 μέτρησης 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 τον λόγο αυτό η θερμότητα Peltier πολύ δύσκολα διαχωρίζεται από τη θερμότητα Joule.

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 ενέργεια μειώνεται, η επαφή ψύχεται. Αυτό όμως σημαίνει ότι μεταξύ των δύο μετάλλων υπάρχει μια διαφορά δυναμικού (Σχ. 32.1.β), η οποία δημιουργείται λόγω διαφορών στις φυσικές ιδιότητες των δύο μετάλλων, και ονομάζεται **εσωτερική διαφορά δυναμικού επαφής** (U_i).



Σχήμα 32.1. (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 $n_A > n_B$, η μετάβαση ηλεκτρονίων από το A στο B δημιουργεί μια εσωτερική διαφορά δυναμικού επαφής, που απεικονίζεται με το σκαλοπάτι. στο (εστιγμένο) ενεργειακό διάγραμμα.

Στο μοντέλο του αερίου ελευθέρων ηλεκτρονίων της Κλασικής Φυσικής, η δημιουργία του βήματος δυναμικού 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.

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

$$n_A = n_B \exp\left(-\frac{eU_i}{kT}\right) \quad (32.2)$$

όπου k είναι 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

$$U_i = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_B}{n_A} \quad (32.3)$$

Σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, ο παράγοντας kT/e είναι περίπου $2,5 \times 10^{-2}$ V, ενώ ο λογάριθμος 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. (32.3), η οποία αποδίδει ικανοποιητικά τόσο την τιμή όσο και την εξάρτηση του εσωτερικού δυναμικού από τη θερμοκρασία.

32.2.3. Το φαινόμενο Seebeck – Θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη

Το 1822, ο πρώτος φυσικός T. J. Seebeck κατέγραψε την εμφάνιση μιας ηλεκτρεγερτικής δύναμης σε ένα κύκλωμα που αποτελείται από δύο διαφορετικά μέταλλα, οι επαφές των οποίων διατηρούνται σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

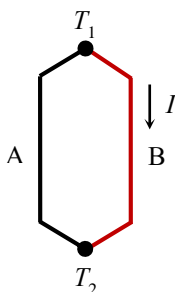
Τους λόγους που προκαλούν την εμφάνιση της ηλεκτρεγερτικής δύναμης θα τους εξετάσουμε στο ίδιο παράδειγμα των αγωγών A και B, μόνο που τώρα θα υποθέσουμε ότι και τα ελεύθερα τους άκρα βρίσκονται σε επαφή (Σχ. 32.2). Όπως βλέπουμε, στο κλειστό αυτό κύκλωμα υπάρχουν δύο επαφές που διατηρούνται σε θερμοκρασίες 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. (32.2)] και τα πρόσημά τους είναι αντίθετα. Έτσι, η συνολική ηλεκτρεγερτική δύναμη του κλειστού κυκλώματος είναι μηδέν μόνο 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

$$U = U_{i1} - U_{i2} = (T_1 - T_2) \frac{k}{e} \ln \frac{n_B}{n_A} \quad (32.4)$$

ή

$$U = C (T_1 - T_2) \quad (32.5)$$

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



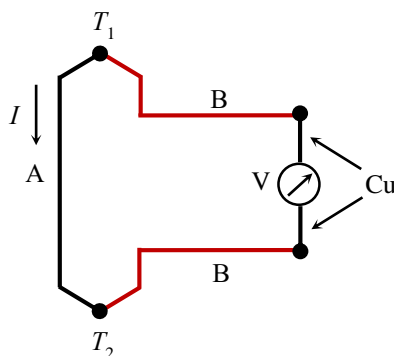
Σχήμα 32.2. Όταν οι επαφές δύο διαφορετικών αγωγών, A και B, βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, το κύκλωμα των αγωγών αυτών διαρρέεται από ρεύμα I , η τιμή του οποίου εξαρτάται από τη διαφορά μεταξύ των δύο θερμοκρασιών T_1 και T_2 . Εδώ $T_1 > T_2$.

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 βολικότερα στη χρήση τους από τα αντίστοιχα γυάλινα και εύθραυστα θερμόμετρα 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.

32.2.4. Το θερμοστοιχείο

Το **θερμοστοιχείο** ή **θερμοζεύγος**, στην απλούστερη μορφή του, 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 δημιούργησε.

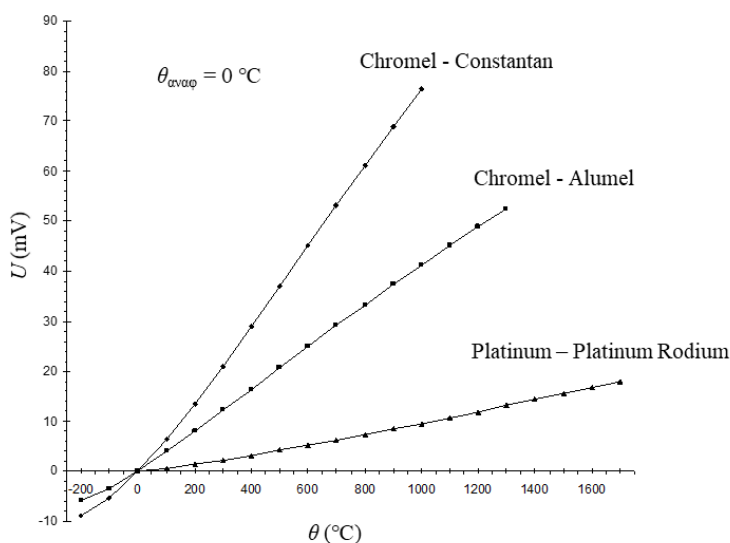


Σχήμα 32.3. Απλοποιημένη παράσταση ενός θερμοστοιχείου, αποτελούμενου από δύο διαφορετικά μέταλλα, A και B, τα σημεία επαφής των οποίων βρίσκονται σε θερμοκρασίες T_1 και T_2 , αντίστοιχα. Στο κύκλωμα εμφανίζονται δύο παρασιτικές επαφές του χαλκού με το μέταλλο B, λόγω της σύνδεσης του μετρητή, οι θερμοηλεκτρικές τάσεις των οποίων αλληλοαναιρούνται όταν οι θερμοκρασίες τους είναι ίσες.

Για να προσδιορίσουμε μια άγνωστη 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 $0\text{ }^\circ\text{C}$).

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.

32.2.5. Χαρακτηριστικές καμπύλες μερικών θερμοζευγών



Σχήμα 32.4. Καμπύλες βαθμονόμησης τριών διαφορετικών 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 είναι αυτό των δύο θερμοζευγών, όπου η θερμοκρασία της επαφής αναφοράς είναι $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Στις καμπύλες αυτές η θερμοηλεκτρεγερτική δύναμη U δίνεται σε mV, ενώ η θερμοκρασία θ 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. (32.5) μπορεί να θεωρηθεί σταθερός.

32.3. Μέθοδος

Η βαθμονόμηση ενός θερμοζεύγους, ή η μέτρηση του συντελεστή αναλογίας C στην Εξ. (32.5), συνίσταται στην ανεύρεση της σχέσης μεταξύ των ενδείξεων του βολτομέτρου U και των ενδείξεων της θερμοκρασίας θ ενός αξιόπιστου θερμομέτρου. Για τον 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, θ_1 του οποίου ελέγχεται και μετριέται με ένα αξιόπιστο θερμόμετρο.

Στην άσκηση αυτή ξεφεύγουμε από το αυστηρό πρωτόκολλο, αντικαθιστώντας το δοχείο των $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ με έναν μεταλλικό κύλινδρο μεγάλης θερμικής αδράνειας, ο οποίος βρίσκεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Αυτό είναι επιτρεπτό, όταν επιθυμεί κανείς να βαθμονομήσει το θερμοζεύγος σε μια στενή περιοχή θερμοκρασιών ($20\text{-}90\text{ }^{\circ}\text{C}$), 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 $0\text{-}90\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $20\text{-}90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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. (32.5), επομένως να βαθμονομήσουμε το θερμοζεύγος μας.

Να προσθέσουμε ακόμη ότι τις θερμοκρασίες θ 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.

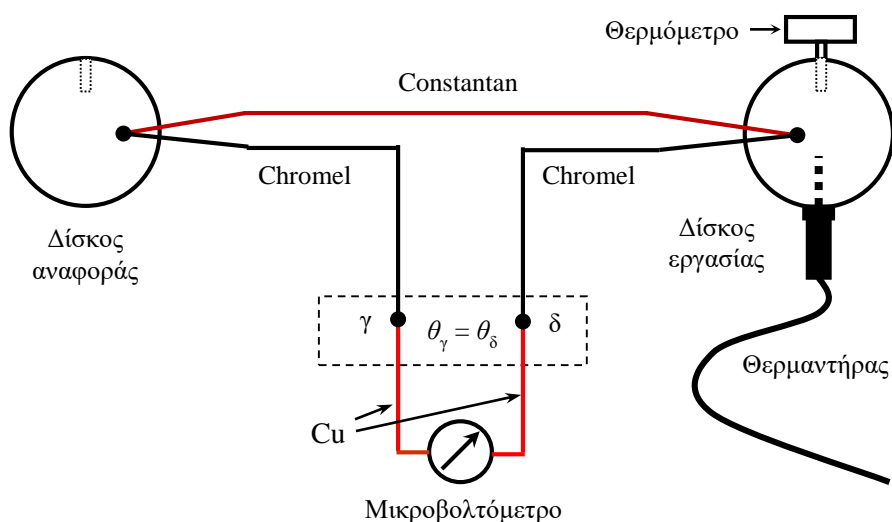
32.4. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη (Σχ. 32.5) περιλαμβάνει:

- 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.λπ. Ο ένας δίσκος (κύριος δίσκος ή **δίσκος εργασίας**) θερμαίνεται έως τους $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, ενώ ο άλλος (**δίσκος αναφοράς**) παραμένει στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Δύο θερμοζεύγη τύπου Chromel-Constantan (Chromel: 90% Ni – 20% Cr και Constantan: 55% Cu – 45% Ni), που βρίσκονται σε καλή θερμική επαφή με τους μεταλλικούς δίσκους, η θερμοκρασία των οποίων μπορεί να μετρηθεί με ένα αξιόπιστο ψηφιακό θερμόμετρο. Η

καλή θερμική επαφή των θερμοζευγών με τους μεταλλικούς δίσκους εξασφαλίζεται με τη χρησιμοποίηση κατάλληλης εποξειδικής κόλλας για τη συγκόλλησή τους.

- Ένα ζευγάρι ορειχάλκινων πλακιδίων, μεταξύ των οποίων βρίσκονται οι επαφές σύνδεσης του βολτομέτρου με τα θερμοζεύγη (σημεία γ και δ στο Σχ. 32.5), ανάμεσα σε δύο φύλλα μίκας, υπό μεγάλη πίεση. Για να αποφευχθεί η δημιουργία παρασιτικών τάσεων, εξαιτίας των σημείων σύνδεσης 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. Η μίκα είναι μονωτής και αποτρέπει το ανεπιθύμητο βραχυκύκλωμα μεταξύ των δύο σημείων σύνδεσης.
- Έναν ηλεκτρικό θερμαντήρα 20 W, υπό μορφή λεπτής θερμαινόμενης ράβδου, διαμέτρου 3,5 mm, η οποία εισάγεται μέσα σε μία ειδική υποδοχή του μεταλλικού δίσκου για τη θέρμανσή του.
- Ένα ψηφιακό θερμόμετρο, που μετρά σε βαθμούς Κελσίου ($^{\circ}\text{C}$), με διακριτική ικανότητα 0,1 $^{\circ}\text{C}$. Το σφάλμα του οργάνου αυτού δεν υπερβαίνει τους 0,5 $^{\circ}\text{C}$.
- Ένα πολύμετρο το οποίο, στην κλίμακα των 200 mV, έχει διακριτική ικανότητα 10 μV και μπορεί επομένως να χρησιμοποιηθεί ως μικροβολτόμετρο.



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. Το ίδιο θερμόμετρο μεταφέρεται από τον έναν δίσκο στον άλλον, ώστε να εξαλειφεται το συστηματικό σφάλμα κατά τη μέτρηση των δύο θερμοκρασιών.

Βιβλιογραφία

1. H. D. Young, R. A. Freedman, *Πανεπιστημιακή Φυσική με Σύγχρονη Φυσική*, Τόμος Α': Μηχανική – Κύματα – Θερμοδυναμική (Αθήνα, 42022), 17.1, 17.2
2. Κ. Δ. Αλεξόπουλος, *Γενική Φυσική*, Τόμος Β': Ηλεκτρισμός (Αθήνα 1993), § 191-193.
3. https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoelectric_effect (τελευταία επίσκεψη: 05/07/2023).
4. <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermocouple> (τελευταία επίσκεψη: 05/07/2023).

5. ΕΜΠ, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής*, Τόμος ΙΙ (Αθήνα, 2011), σ. 181-190, 337-339.

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 δίσκων.
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 του δίσκου εργασίας.

3. Εισάγετε τον θερμαντήρα στον δίσκο 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 δίσκου εργασίας αρχίζει να ανεβαίνει αργά, σημειώστε τις τιμές της θερμοκρασίας θ και τις αντίστοιχες τιμές του μικροβολτομέτρου U , συμπληρώνοντας τον Πίνακα Ι. Η θερμοκρασία του δίσκου δεν πρέπει να υπερβεί τους 90 °C, διότι στις υψηλότερες θερμοκρασίες υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του θερμομέτρου και της εποξειδικής κόλλας.

5. Σβήστε τον θερμαντήρα, το πολύμετρο και το ψηφιακό θερμόμετρο.

Πίνακας Ι

θ (°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 Ι, υπολογίστε τις διαφορές $\Delta\theta = \theta - \theta_{\text{περ}}$.
2. Σχεδιάστε τη γραφική παράσταση της τάσης U ως συνάρτηση του $\Delta\theta$.
3. Από την κλίση της ευθείας, υπολογίστε την τιμή της σταθεράς C του θερμοζεύγους Chromel-Constantan στο διάστημα 0-70 °C, καθώς και το σφάλμα της δC .
4. Είναι σε ικανοποιητικό βαθμό γραμμική η σχέση $U = f(\Delta\theta)$;