

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

Θερμομετρία

10.1 Εισαγωγή

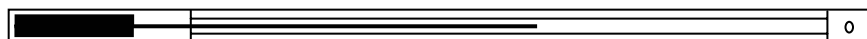
Είναι γνωστή η επίδραση της θερμοκρασίας στους ζωντανούς οργανισμούς και στις ιδιότητες των υλικών. Για τον λόγο αυτό, η μέτρησή της συνοδεύει σχεδόν το σύνολο των δραστηριοτήτων του ανθρώπου. Από καθαρά φυσική σκοπιά, η θερμοκρασία χαρακτηρίζει τη μέση κινητική ενέργεια των μορίων του σώματος και δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Κάθε όργανο που προορίζεται για τη μέτρησή της, συνήθως μετρά μια άλλη παράμετρο η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία μονοσήμαντα, όπως π.χ. ο όγκος ενός αερίου, υγρού ή στερεού, το μήκος ενός μετάλλου, η πίεση ενός αερίου, η ηλεκτρική αντίσταση, ο λευκός θόρυβος, το ανάστροφο ρεύμα μιας διόδου, ενός τρανζίστορ κ.τ.λ.

Το πρώτο θερμόμετρο κατασκευάστηκε για ερευνητικούς σκοπούς από τον Γαλιλαίο, το 1592. Στο θερμόμετρο αυτό (*θερμοσκόπιο*, όπως το αποκαλούσε), ένα γυάλινο μπαλονάκι με αέρα συνδεόταν, μέσω ενός γυάλινου λεπτού σωλήνα, με ένα δοχείο που περιείχε ένα χρωματισμένο υγρό. Το υγρό αυτό κάλυπτε και ένα μέρος του λεπτού σωλήνα και δημιουργούσε έτσι μία λεπτή στήλη υγρού που επικοινωνούσε με τον αέρα στο μπαλονάκι. Καθώς αυξανόταν η θερμοκρασία του αέρα στο μπαλονάκι, αυτό προκαλούσε αύξηση της πίεσης με επακόλουθο τη μετατόπιση της θέσης του μηνίσκου της στήλης.

Στα θερμόμετρα υγρού αξιοποιείται η μεταβολή του όγκου ενός υγρού με τη θερμοκρασία. Το πρώτο γυάλινο θερμόμετρο υγρού, όμοιο με αυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα, κατασκευάστηκε το 1654 από τον μαθητή του Γαλιλαίου, τον Δούκα της Τοσκάνης, Φερδινάνδο II. Το θερμόμετρο ήταν φτιαγμένο από ένα στεγανοποιημένο γυάλινο δοχείο που περιείχε χρωματισμένη αλκοόλη και έναν τριχοειδή γυάλινο σωλήνα. Με τον τρόπο αυτό παραγόταν μία κάθετη λεπτή στήλη υγρού το ύψος της οποίας μεταβαλλόταν καθώς, λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας, μεταβαλλόταν ο συνολικός όγκος του υγρού. Τα σύγχρονα γυάλινα θερμόμετρα υγρού εν πολλοίς επαναλαμβάνουν την κατασκευή αυτή, και διαφέρουν μόνο ως προς την τελειότητα με την οποία είναι κατασκευασμένα τα διάφορα τους μέρη.

10.2 Γυάλινα θερμόμετρα υγρού

Τα θερμόμετρα υγρού είναι αξιόπιστα, φθηνά και απλά στη χρήση τους και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ευρέως ακόμα και σήμερα. Κάθε χρόνο παράγονται δεκάδες εκατομμύρια θερμόμετρα αυτού του τύπου που καλύπτουν την κλίμακα από -200 έως 1200°C .



Σχήμα 10.1.

Το θερμόμετρο αποτελείται από μία στεγανοποιημένη γυάλινη ράβδο στο ένα άκρο της οποίας βρίσκεται μία κοιλότητα με το χρωματισμένο υγρό, η οποία επικοινωνεί με έναν γυάλινο τριχοειδή σωλήνα (Σχ. 10.1). Η μεταβολή του όγκου του υγρού στην

κοιλότητα, προκαλεί μεταβολή του μήκους της στήλης του υγρού στον τριχοειδή. Η κλίμακα του μετρητή βρίσκεται πάνω στη ράβδο και πίσω από τον τριχοειδή σωλήνα. Σε μερικά θερμοόμετρα, η κλίμακα χαράζεται επάνω στον τριχοειδή σωλήνα. Συνήθως, η ελάχιστη υποδιαίρεση της κλίμακας είναι 1 °C, αν και υπάρχουν μετρητές με διακριτική ικανότητα των 0,5, 0,2, 0,1, 0,05, 0,02, ή και 0,01 °C. Στον Πίνακα 10.1 δίνονται οι βασικότερες ιδιότητες των υγρών που χρησιμοποιούνται σε θερμοόμετρα.

Πίνακας 10.1

Ουσία	Θερμικός συντελεστής διαστολής ($\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)	Θερμοκρασία στερεοποίησης °C	Θερμοκρασία βρασμού °C
Υδράργυρος (Hg)	182,5	- 38,87	356,7
Αμάλγαμα θαλλίου (8,5 % Tl)	182	- 60	360 έως 1400
Σύνθετο αμάλγαμα	180	- 90	360 έως 2000
Γάλλιο (Ga)	55	29,8	2070
Ακετόνη (CO(CH ₃) ₂)	1310	- 93,9 έως - 94,9	56,0
Πετρέλαιο	1150	- 50 έως - 15	200 έως 290
Πεντάνιο (C ₅ H ₁₂)	1550	χαμηλότερη από - 200	30 έως 40
Αιθυλική αλκοόλη (C ₂ H ₅ OH)	1100	- 111,8 έως - 117,3	77,7 έως 78,4
Μεθυλική αλκοόλη (CH ₃ OH)	1220	- 93,9 έως - 97,8	64,2 έως 66,0
Υδρόθειο (CS ₂)	1210	- 113,0	46,0
Τολουόλη (C ₆ H ₁₅ CH ₃)	1090	- 92,4 έως - 102,0	109,2 έως 110,6

10.2.1 Θερμόμετρα ηλεκτρικής επαφής

Τα γυάλινα θερμοόμετρα επιτρέπουν μεν την ανάγνωση της τιμής της θερμοκρασίας, αλλά έχουν ένα μεγάλο μειονέκτημα: δεν μπορούν να συνδεθούν με τα ηλεκτρονικά κυκλώματα των συστημάτων ελέγχου της θερμοκρασίας. Η αδυναμία αυτή, εν μέρει θεραπεύεται στα θερμοόμετρα ηλεκτρικής επαφής ή απλώς επαφής (Σχ. 10.2). Για υγρό χρησιμοποιείται ο υδράργυρος, η στήλη του οποίου, σε μία ορισμένη θερμοκρασία, έρχεται σε επαφή με ένα λεπτό σύρμα από λευκόχρυσο που βρίσκεται μέσα στον τριχοειδή σωλήνα. Το δεύτερο σύρμα βρίσκεται σε μόνιμη ηλεκτρική επαφή με τον υδράργυρο που βρίσκεται στη κοιλότητα του θερμοόμετρου. Με τον τρόπο αυτό, το θερμοόμετρο μετατρέπεται σε έναν ηλεκτρικό διακόπτη που κλείνει σε μία ορισμένη θερμοκρασία και έτσι γίνεται δυνατός ο έλεγχός της.



Σχήμα 10.2

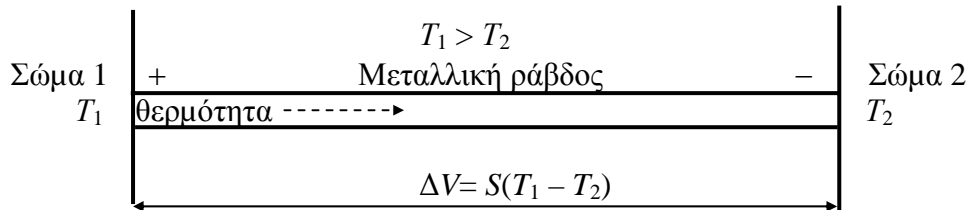
10.2.2 Γαλβίνα θερμομέτρα μέτρησης υψηλών θερμοκρασιών

Στα θερμομέτρα που προορίζονται για τη μέτρηση θερμοκρασιών που δεν ξεπερνούν τους $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, στον χώρο πάνω από τον μηνίσκο της στήλης του υγρού υπάρχει κενό. Αντίθετα, στα θερμομέτρα που προορίζονται για τη μέτρηση υψηλότερων θερμοκρασιών, στον χώρο αυτό δημιουργείται υψηλή πίεση με κάποιο αέριο, ώστε να αποτραπεί η εξάχνωση ή ακόμα και ο βρασμός του υγρού. Στα όργανα αυτά, συνήθως χρησιμοποιείται ο υδράργυρος. Κατασκευάζονται από πυρέξ ή από χαλαζία. Το αέριο που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι αδρανές και να μην αντιδρά με τον υδράργυρο. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται το άζωτο, το ήλιο, το αργό, όπως επίσης και το διοξείδιο του άνθρακα. Με το θερμομέτρο στο οποίο χρησιμοποιείται το ήλιο και είναι κατασκευασμένο από χαλαζία, η μέγιστη θερμοκρασία που μπορεί να μετρηθεί, φτάνει τους $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Στο θερμομέτρο στο οποίο χρησιμοποιείται το γάλλιο, η θερμοκρασία των $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ μπορεί να μετρηθεί και χωρίς τη χρησιμοποίηση των υψηλών πιέσεων. Όμως τα θερμομέτρα αυτά έχουν ένα μεγάλο μειονέκτημα. Η φύλαξή τους πρέπει να γίνεται σε θερμοκρασίες που να αποτρέπουν τη στερεοποίηση του γαλλίου. Εάν συμβεί αυτό, το θερμομέτρο καταστρέφεται λόγω αύξησης του όγκου του γαλλίου που συνοδεύει τη στερεοποίησή του.

10.3 Θερμοζεύγος

Στο σύνολο των θερμομέτρων που παράγει η σύγχρονη τεχνολογία, ειδική θέση κατέχουν αυτά στα οποία η θερμοκρασία οδηγεί στη δημιουργία ενός ηλεκτρικού σήματος. Τα θερμομέτρα αυτά αποτελούν αναπόσπαστο μέρος όλων των συστημάτων αυτομάτου ελέγχου θερμοκρασίας και είναι αναντικατάστατα εκεί όπου οι απαιτήσεις της τεχνολογίας, ως προς τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, είναι ιδιαίτερα αυστηρές. Ο πιο διαδεδομένος αισθητήρας αυτού του τύπου είναι το *θερμοζεύγος*, η αρχή λειτουργίας του οποίου στηρίζεται στο *θερμοηλεκτρικό φαινόμενο*. Ο αισθητήρας αυτός ουσιαστικά αποτελείται από δύο κολλημένα μεταξύ τους σύρματα, στα άκρα των οποίων εμφανίζεται μία τάση όταν το σημείο επαφής τους θερμαίνεται. Το θερμοζεύγος είναι μία πολύ απλή κατασκευή, έχει μικρή θερμική αδράνεια, και είναι ένας άθραυστος και εύχρηστος αισθητήρας θερμοκρασίας. Σήμερα, το θερμοζεύγος κατέχει κυρίαρχη θέση στην επιστημονική έρευνα και τεχνολογία και καλύπτει μία περιοχή θερμοκρασιών που εκτείνεται από 2 έως 3000 K .

Θα αρχίσουμε την ανάλυση του θερμοηλεκτρικού φαινομένου με την εξέταση μιας λεπτής μεταλλικής ράβδου, τα άκρα της οποίας βρίσκονται σε θερμική επαφή με δύο σώματα των οποίων οι θερμοκρασίες είναι T_1 και T_2 αντίστοιχα (Σχ. 10.3).



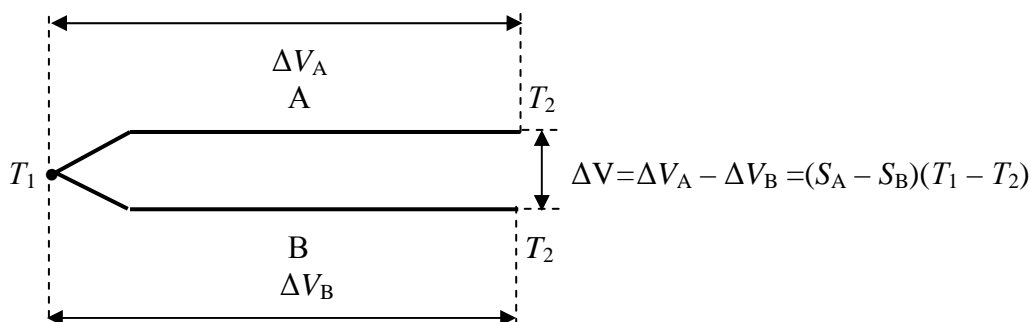
Σχήμα 10.3.

Έστω ότι $T_1 > T_2$. Η παρουσία της θερμοβαθμίδας προκαλεί ροή θερμότητας από το θερμό προς το ψυχρό άκρο της ράβδου. Όπως είναι γνωστό, στα μέταλλα, η ροή της θερμότητας οφείλεται κυρίως στην κίνηση ηλεκτρονίων. Τα ηλεκτρόνια του θερμότερου άκρου, ως έχοντα μεγαλύτερες ενέργειες, θα διαχέονται πιο εύκολα προς το ψυχρό άκρο από ό,τι αυτά του ψυχρότερου άκρου προς το θερμότερο. Οι δύο ροές αλληλοαναιρούνται όταν οι πυκνότητες ηλεκτρονίων στα δύο άκρα διαφέρουν. Αυτό οδηγεί στη δημιουργία μιας διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στα δύο άκρα της ράβδου. Από πειράματα προκύπτει ότι η διαφορά δυναμικού είναι ανάλογη της διαφοράς των θερμοκρασιών, δηλαδή

$$\delta V = S(T)(T_1 - T_2), \quad (10.1)$$

όπου $S(T)$ είναι ο συντελεστής αναλογίας και ονομάζεται *απόλυτος θερμοηλεκτρικός συντελεστής* του υλικού της ράβδου. Ο συντελεστής αυτός πολύ δύσκολα μετράται άμεσα και εξαρτάται από τη θερμοκρασία και από τις ηλεκτρονικές ιδιότητες του υλικού, όπως π.χ. τη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων και την ευκινησία τους.

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται δύο λεπτές μεταλλικές ράβδοι, ή, σωστότερα, σύρματα, ενωμένα μεταξύ τους και με διαφορετική τιμή των συντελεστών S_A και S_B (Σχ. 10.4). Όσο περισσότερο διαφέρουν οι συντελεστές αυτοί, τόσο μεγαλύτερη είναι η ευαισθησία του θερμοζεύγους. Το σημείο σύντηξης των δύο συρμάτων έρχεται σε καλή θερμική επαφή με το αντικείμενο του οποίου τη θερμοκρασία θέλουν να μετρήσουν. Τα δύο ελεύθερα άκρα έχουν συνήθως τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και άμεσα ή έμμεσα συνδέονται με ένα βολτόμετρο.



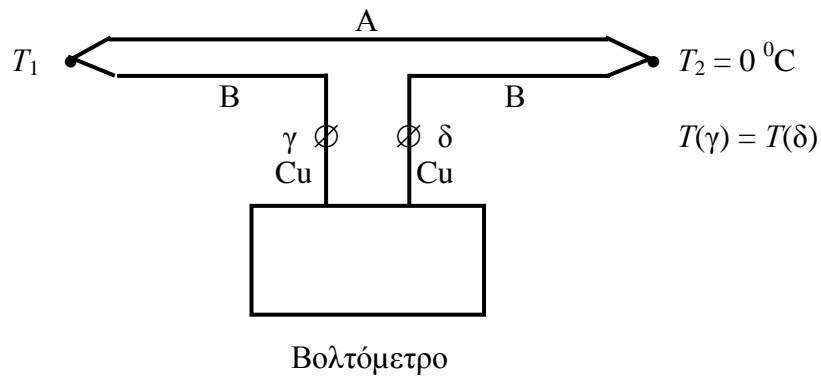
Σχήμα 10.4.

Η διάταξη που δίνεται στο Σχ. 10.4 ονομάζεται *θερμοζεύγος*. Στα ψυχρά άκρα του θερμοζεύγους εμφανίζεται μία τάση η οποία είναι ανάλογη προς τη διαφορά $(T_1 - T_2)$, ο δε συντελεστής αναλογίας είναι $(S_A - S_B)$. Βλέπουμε λοιπόν ότι η θερμοκρασία της

θερμής επαφής του θερμοζεύγους μπορεί να μετρηθεί μέσω μέτρησης της τάσης που δημιουργείται στα ψυχρά του άκρα. Η σχέση τάση–θερμοκρασία μετρήθηκε στα διάφορα ζεύγη μετάλλων και δίνεται σε ειδικούς πίνακες. Γενικά, ο συντελεστής αναλογίας στη σχέση αυτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία, αλλά σε στενά όρια μεταβολής της, μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι σταθερός αριθμός (Σχ. 10.6).

Πρέπει να σημειωθεί ότι με το θερμοζεύγος μετράται η διαφορά των θερμοκρασιών, δηλαδή κατά πόσο η επαφή είναι θερμότερη από τα ψυχρά άκρα. Συνεπώς, για να μετρηθεί η θερμοκρασία της επαφής σωστά, θα πρέπει να ελέγχεται η θερμοκρασία των ψυχρών άκρων. Το γεγονός αυτό κάνει τη μέτρηση κάπως περίπλοκη. Η παράκαμψη της δυσκολίας αυτής γίνεται με δύο τρόπους.

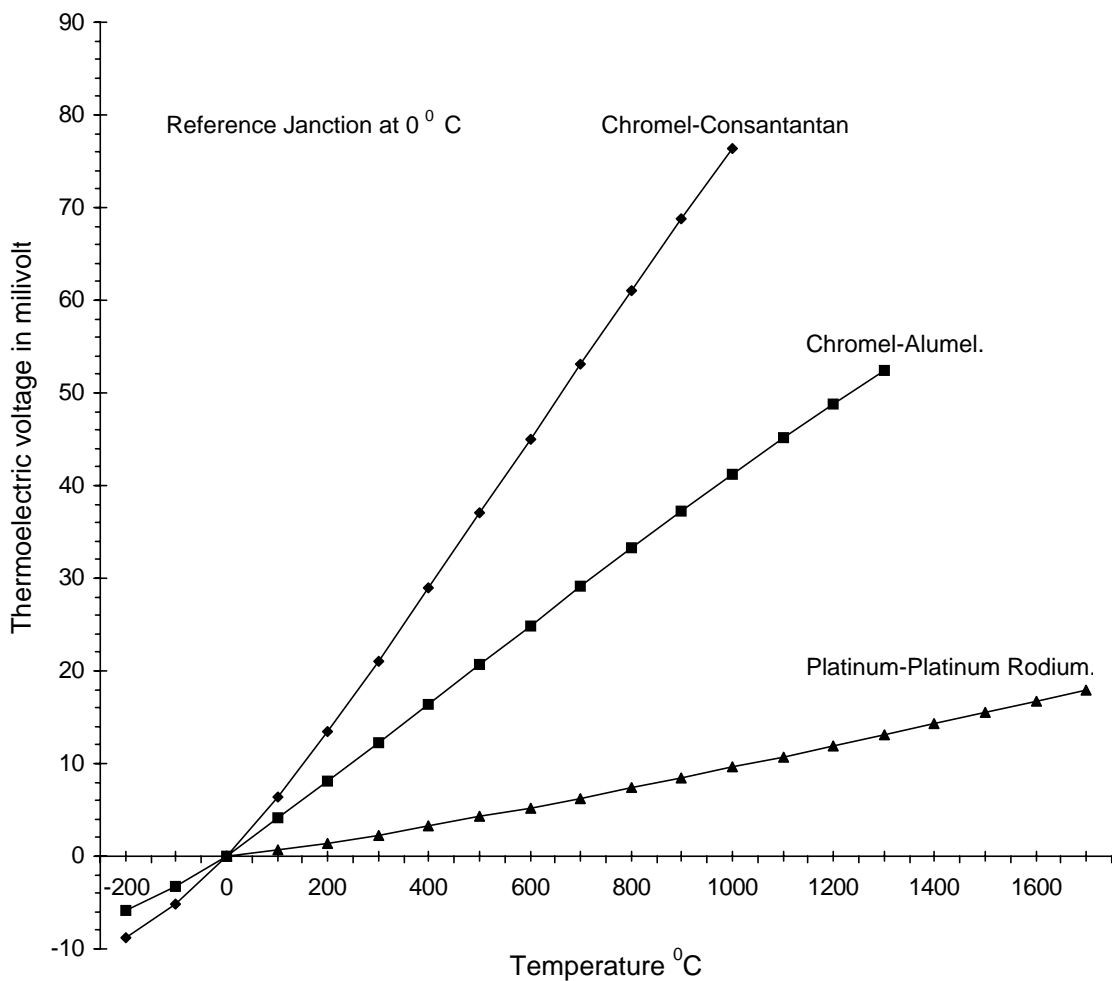
(α) Η μέθοδος των δύο θερμοζευγών.



Σχήμα 10.5.

Στη μέθοδο αυτή, τα δύο σύρματα, A και B , δημιουργούν δύο θερμοζεύγη. Η μία επαφή βρίσκεται σε θερμική επαφή με το αντικείμενο, ενώ η δεύτερη, η οποία ονομάζεται *επαφή αναφοράς*, εμβαπτίζεται σε ένα δοχείο που περιέχει νερό με πάγο και έτσι, η θερμοκρασία του διατηρείται μόνιμα στους 0°C . Το σύρμα B κόβεται, και στα άκρα που έτσι δημιουργούνται συνδέεται ένα βολτόμετρο, συνήθως χρησιμοποιώντας χάλκινα σύρματα (Σχ. 10.5). Στη συνδεσμολογία αυτή, οι θερμοηλεκτρικές τάσεις που δημιουργούνται στα δύο θερμοζεύγη αφαιρούνται. Συνεπώς, η τάση που δημιουργείται ανάμεσα στα σημεία γ και δ εξαρτάται από τη διαφορά των θερμοκρασιών $(T_1 - T_2) = (T_1 - 0) = T_1$, και, όπως βλέπουμε, είναι συνάρτηση μόνο της θερμοκρασίας T_1 . Οι ενδείξεις του μετρητή εξαρτώνται όμως και από τις τάσεις που δημιουργούνται στις επαφές γ και δ . Στην επιλεγείσα συνδεσμολογία, και αυτές οι τάσεις αφαιρούνται. Το υπόλοιπό από την αφαίρεση μπορεί να εξαλειφθεί πλήρως εάν οι θερμοκρασίες των επαφών γ και δ γίνουν ίσες. Η τιμή αυτής της κοινής θερμοκρασίας δεν είναι σημαντική, φτάνει αυτές να είναι η ίδια στις δύο επαφές, κάτι που πολύ εύκολα επιτυγχάνεται στην πράξη.

Στο θερμοζεύγος χαλκού–κωνσταντάνης, ο αγωγός B είναι από χαλκό. Έτσι, στα σημεία σύνδεσης συνδέονται δύο αγωγοί από ίδιο υλικό, τον χαλκό, και συνεπώς, στο θερμοζεύγος αυτό, ο όρος $T(\gamma) = T(\delta)$ δεν είναι απαραίτητος. Αυτό είναι ένα από τα πλεονεκτήματα του θερμοζεύγους χαλκού–κωνσταντάνης.



Σχήμα 10.6.

Στο Σχ. 10.6 δίνονται οι τιμές της τάσης που δημιουργείται στα σημεία σύνδεσης γ και δ, σε διάφορα θερμοζεύγη, όταν η θερμοκρασία της επαφής αναφοράς είναι 0 °C.

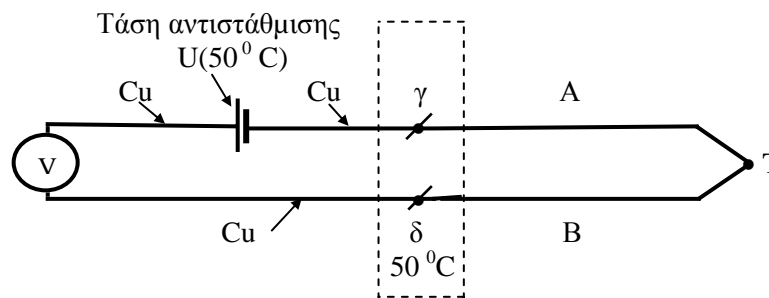
(β) Η μέθοδος του ενός θερμοζεύγους.

Η μέθοδος αυτή είναι και η πλέον διαδεδομένη. Στην πράξη αποφεύγεται η χρήση δύο θερμοζευγών κυρίως λόγω της ανάγκης χρήσης του δοχείου με το χιονόνερο, κάτι που είναι κάπως άβολο. Έτσι, προτιμάται η χρήση ενός θερμοζεύγους (Σχ. 10.4). Το πρόβλημα εδώ εντοπίζεται στα ψυχρά σημεία του θερμοζεύγους, τα οποία, κατά κανόνα, συνδέονται με τον μετρητή τάσης με σύρματα από χαλκό. Στα σημεία σύνδεσης δημιουργούνται θερμοηλεκτρικές τάσεις οι οποίες αφαιρούνται μεν αλλά οι τιμές τους, δυστυχώς, δεν είναι ίδιες. Έτσι, παραμένει κάποιο υπόλοιπο το οποίο εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, πράγμα που αποτελεί πρόβλημα. Το υπόλοιπο αυτό επηρεάζει τη συνιστάμενη τιμή της τάσης που παράγεται από το θερμοζεύγους και έτσι οι μετρήσεις επηρεάζονται από της μεταβολές της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος.

Στους μετρητές που χρησιμοποιούν ένα θερμοζεύγος, τα σημεία σύνδεσης θερμοστατούνται σε μια θερμοκρασία που είναι υψηλότερη από αυτήν του

περιβάλλοντος, π.χ. στους 50°C . Το δε υπόλοιπο της τάσης που δημιουργείται στα σημεία σύνδεσης αφαιρείται μέσω της εφαρμογής μιας σταθερής τάσης αντιστάθμισης η οποία μπορεί να ρυθμίζεται (Σχ. 10.7). Για τη ρύθμιση της τάσης αυτής, το θερμοζεύγος εμβαπτίζεται στο δοχείο που περιέχει νερό με πάγο και εν συνεχεία η τιμή της τάσης ρυθμίζεται έως ότου το βολτόμετρο να δείχνει μηδέν. Όμως, επειδή η τάση αντιστάθμισης μεταβάλλεται με τον χρόνο, ο έλεγχος και η ρύθμιση του μηδενός πρέπει να επαναλαμβάνεται σε τακτά χρονικά διαστήματα.

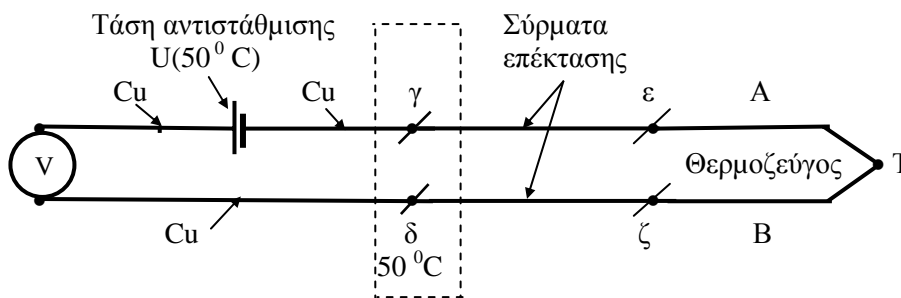
Τα σύγχρονα θερμοόμετρα, κατά κανόνα, είναι ψηφιακά όργανα που καλύπτουν την περιοχή -200 έως $+1000^{\circ}\text{C}$ με διακριτική ικανότητα $0,1^{\circ}\text{C}$. Συνήθως, ο θερμοστάτης βρίσκεται εντός του οργάνου, σε μία ειδική θέση όπου γίνεται η σύνδεση με το θερμοζεύγος. Σε όλα τα όργανα, η θερμοκρασία στον θερμοστάτη ελέγχεται ηλεκτρονικά και διατηρείται σταθερή με μεγάλη ακρίβεια.



Σχήμα 10.7.

Επιμήκυνση του θερμοζεύγους

Συχνά, το μήκος του θερμοζεύγους δεν επαρκεί για να καλυφθεί η απόσταση που χωρίζει τον μετρητή θερμοκρασίας από το αντικείμενο μελέτης. Στις περιπτώσεις αυτές η επιμήκυνση του θερμοζεύγους γίνεται με ειδικά ζεύγη συρμάτων επέκτασης. Κάθε είδος θερμοζεύγους έχει το δικό του ζεύγος επέκτασης. Το σύρμα επέκτασης κατασκευάζεται από κράμα, το οποίο, στη θερμοκρασία δωματίου, έχει συντελεστή θερμοηλεκτρικής τάσης ίδιο με αυτόν που έχει το αντίστοιχο σύρμα του θερμοζεύγους. Συνεπώς, η θερμοστάτηση των σημείων σύνδεσης του θερμοζεύγους με τα σύρματα επέκτασης (σημεία ϵ και ζ) δεν είναι απαραίτητη (Σχ. 10.8).



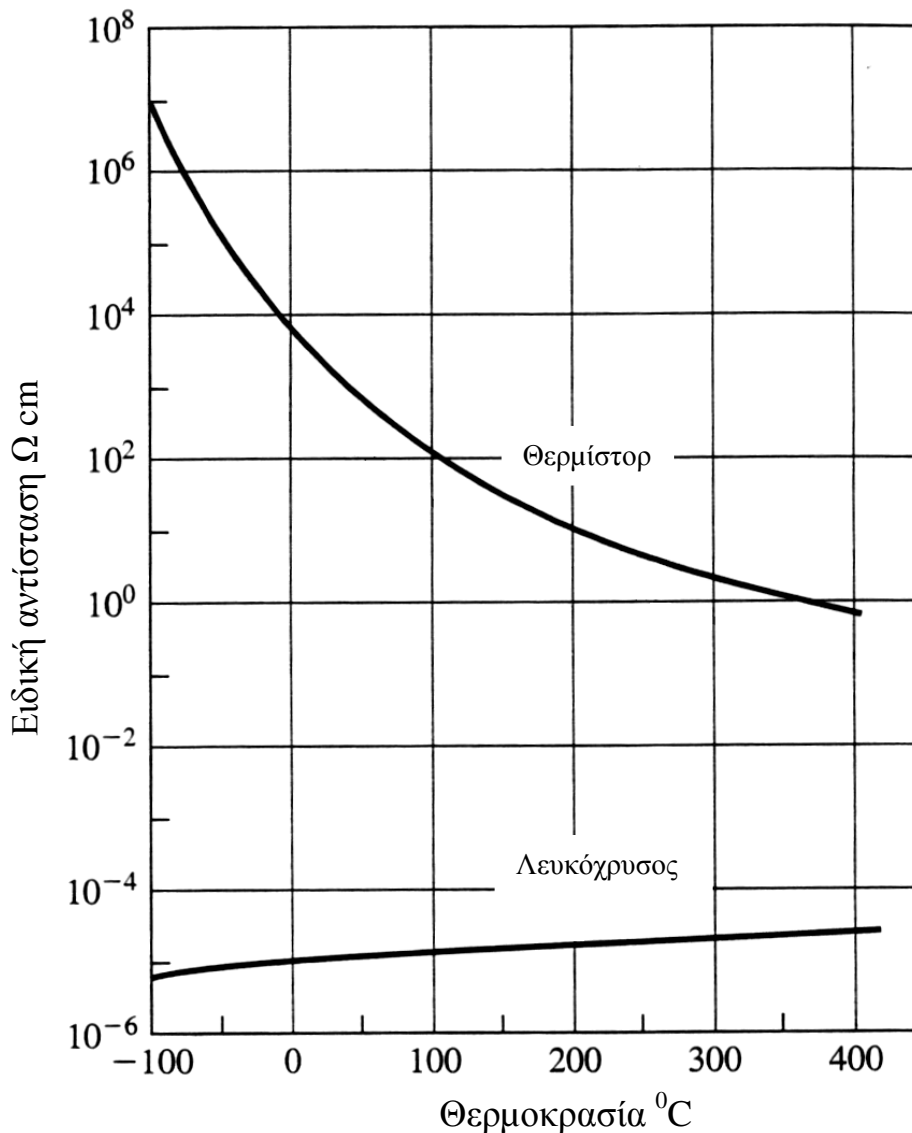
Σχήμα 10.8.

10.4 Θερμόμετρα αντίστασης

10.4.1 Θερμόμετρα αντίστασης μεταλλικών αγωγών

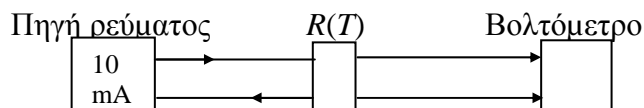
Η αρχή λειτουργίας των μετρητών αυτών στηρίζεται στην εξάρτηση της αντίστασης ενός μεταλλικού αγωγού από τη θερμοκρασία. Η συνάρτηση αυτή παρατηρείται σε όλα τα μέταλλα, πλην όμως, στη θερμομετρία χρησιμοποιείται μόνο ένας μικρός αριθμός από αυτά, κυρίως ο λευκόχρυσος και ο χαλκός. Ο χαλκός, λόγω της χημικής του δραστηριότητας, χρησιμοποιείται για τη μέτρηση θερμοκρασιών που δε ξεπερνούν τους 200 °C. Στους αισθητήρες από λευκόχρυσο, λόγω της μεγάλης χημικής αδράνειας του υλικού αυτού, το άνω όριο φτάνει τους 1100 °C.

Ο αισθητήρας από λευκόχρυσο κατασκευάζεται από λεπτό σύρμα, η διάμετρος του οποίου κυμαίνεται από 0,05 έως 0,2 mm. Το σύρμα τυλίγεται πάνω σε ένα μικρό κύλινδρο από τεχνητό ζαφείρι, η δε ολική αντίσταση του αισθητήρα κυμαίνεται από 50 έως 500 Ω. Στο Σχ. 10.9 δίνεται η γραφική παράσταση της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας για έναν αισθητήρα από λευκόχρυσο.



Σχήμα 10.9.

Οι μετρητές θερμοκρασίας αυτού του τύπου έχουν μία ενσωματωμένη πηγή σταθερού ρεύματος των 10 mA η οποία τροφοδοτεί τον αισθητήρα. Εν συνεχεία, η πτώση τάσης που δημιουργείται στη μετρητική αντίσταση μετράται με ένα βολτόμετρο (Σχ. 10.10) και χρησιμοποιείται ως μέτρο της τιμής της αντίστασης $R(T)$.



Σχήμα 10.10.

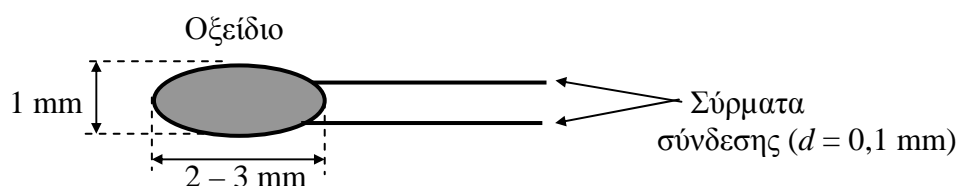
10.4.2 Αισθητήρες αντίστασης από οξειδία μετάλλων

Τα τελευταία χρόνια, αυξήθηκε σημαντικά η χρήση θερμομέτρων με αισθητήρα από οξειδία μετάλλων. Τα όργανα αυτά είναι σχετικά φτηνά, φορητά, με ψηφιακή ένδειξη και καλύπτουν την περιοχή από -50 έως 150 °C με διακριτική ικανότητα $0,1$ °C. Το σφάλμα τους είναι της τάξης $0,2 - 0,4$ °C.



Σχήμα 10.11.

Ο αισθητήρας τους κατασκευάζεται από οξειδία μετάλλων με μη στοιχειομετρική σύνθεση όπως π.χ. το $MgTiO_3$. Στις ουσίες αυτές ο συντελεστής αντίστασης είναι αρνητικός, δηλαδή, η αντίσταση μειώνεται καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται (Thermistor). Η τιμή της αντίστασης ελέγχεται από τους κατασκευαστές μέσω μεταβολής του ποσοστού του οξυγόνου στην ένωση. Στα οξειδία, η ποσοστιαία μεταβολή της αντίστασης ανά μονάδα θερμοκρασίας είναι εκατομμύρια φορές μεγαλύτερη από αυτήν των μετάλλων (πβλ. Σχ. 10.9). Το γεγονός αυτό, απλοποιεί σε μεγάλο βαθμό τα ηλεκτρονικά κυκλώματα επεξεργασίας του σήματος, και αυτός είναι ο κύριος λόγος της ραγδαίας εξάπλωσής τους. Οι συνήθεις διαστάσεις των αισθητήρων αυτού του τύπου είναι $2 - 3$ mm για το μήκος τους και 1 mm για τη διάμετρό τους (Σχ. 10.11), αν και αναφέρονται αισθητήρες με διάμετρο $0,1$ mm.



Σχήμα 10.12.

Στους αισθητήρες οξειδίων, η μεταβολή της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας υπακούει στη σχέση

$$R(T) = R_0 \exp \left[-B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (10.2)$$

όπου R_0 είναι η αντίσταση στη θερμοκρασία T_0 και B είναι μία σταθερά η οποία εξαρτάται από τη σύνθεση του οξειδίου και από τον τρόπο παρασκευής του αισθητήρα. Στη θερμοκρασία δωματίου, η αντίσταση του αισθητήρα είναι της τάξης των 3 έως 5 kΩ. Το γεγονός αυτό κάνει πολύ εύκολη την προσαρμογή του αισθητήρα στα συνήθη ηλεκτρονικά κυκλώματα.

10.5 Οπτική πυρομετρία

Δύο σύρματα από κράματα βολφραμίου με 5 και 20 % ρένιο, συγκροτούν το θερμοζεύγος βολφράμιο – βολφράμιο ρήνιο, με το οποίο μπορεί να μετρηθεί θερμοκρασία που φτάνει και τους 2200 °C. Το θερμοζεύγος αυτό χρησιμοποιείται εκεί όπου αυτό περιβάλλεται από κάποιο αδρανές αέριο ή υδρογόνο, ή βρίσκεται στο κενό. Ακόμα και μικρά ίχνη οξυγόνου καταστρέφουν το θερμοζεύγος, μια και το βολφράμιο αρχίζει να οξειδώνεται στους 600 °C. Εκεί όπου το θερμοζεύγος αυτό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, οι υψηλές θερμοκρασίες μετρώνται με μεθόδους *οπτικής πυρομετρίας*. Με τα *πυρόμετρα* είναι δυνατή η μέτρηση θερμοκρασιών που φτάνουν τους 10000 °C. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου πρέπει να αναφέρουμε και το γεγονός ότι η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται εξ αποστάσεως, χωρίς να απαιτείται θερμική επαφή με το αντικείμενο.

Η οπτική πυρομετρία στηρίζεται στους νόμους που διέπουν την ακτινοβολία του μέλανος σώματος. Έτσι, η ένταση της ακτινοβολίας, στη θερμοκρασία T , γωνιακή συχνότητα ω και διάστημα $d\omega$, δίνεται από τη σχέση του Πλανκ:

$$E(\omega)d\omega = \frac{\hbar}{4\pi^2 c^2} \frac{\omega^3 d\omega}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1}, \quad (10.3)$$

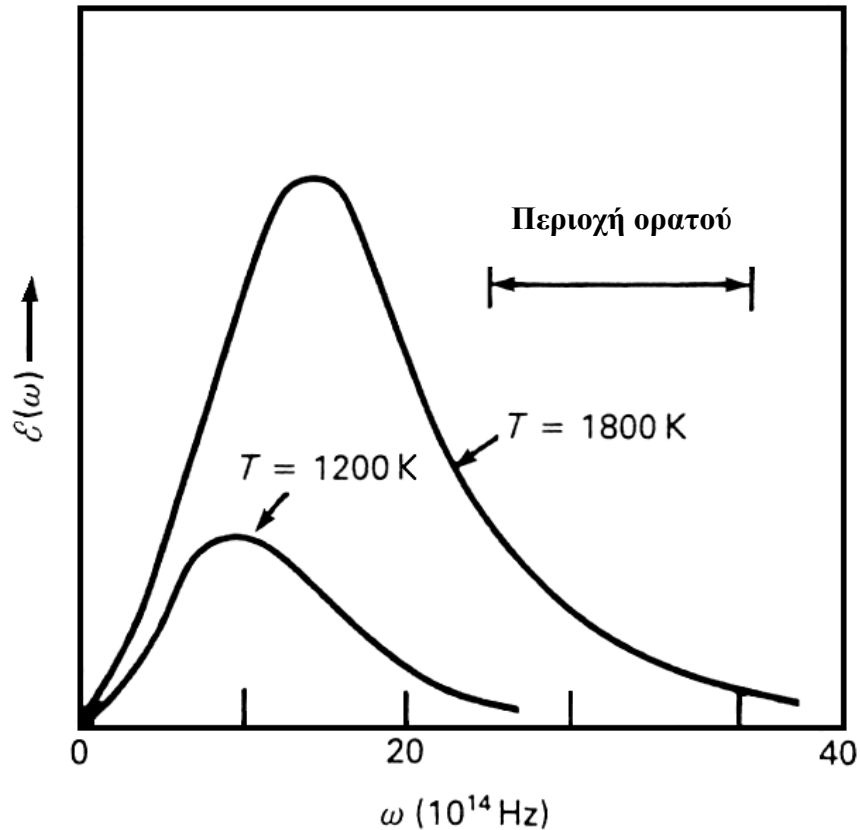
όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός, $\hbar = h/2\pi$, h η σταθερά του Πλανκ και k η σταθερά του Μπόλτςμαν. Στο Σχ. 10.13 δίνεται η συνάρτηση $E(\omega)$ για δύο διαφορετικές θερμοκρασίες του μέλανος σώματος.

Η ολική ενέργεια που ακτινοβολείται από το μέλαν σώμα ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας δίνεται από τη σχέση των Stefan-Boltzmann και είναι

$$E(T) = \sigma T^4, \quad (10.4)$$

όπου σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann.

Η θερμοκρασία του σώματος μπορεί να μετρηθεί ή από τη σχέση (10.3), ή από τη σχέση (10.4). Η εφαρμογή της σχέσης (10.3) είναι κάπως πιο περίπλοκη και για τον λόγο αυτό, στην πράξη, προτιμάται η εφαρμογή της σχέσης (10.4). Κατά την εφαρμογή της σχέσης (10.4) πρέπει να λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι η ακτινοβολία των σωμάτων διαφέρει από αυτήν του μέλανος σώματος. Το γεγονός αυτό αποδίδεται με τον λεγόμενο *συντελεστή μελανότητας* ο οποίος διαφέρει από σώμα σε



Σχήμα 10.13

σώμα, αλλά ακόμα και στο ίδιο σώμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα της ακτινοβολίας. Έτσι, η σχέση (10.4) τροποποιείται σε

$$E(T) = \varepsilon \sigma T^4, \quad (10.5)$$

όπου ε είναι η μέση μελανότητα του σώματος στη θερμοκρασία T και υπολογίζεται από τη σχέση

$$\varepsilon(T) = \int_0^{\infty} \varepsilon(\omega, T) d\omega \quad (10.6)$$

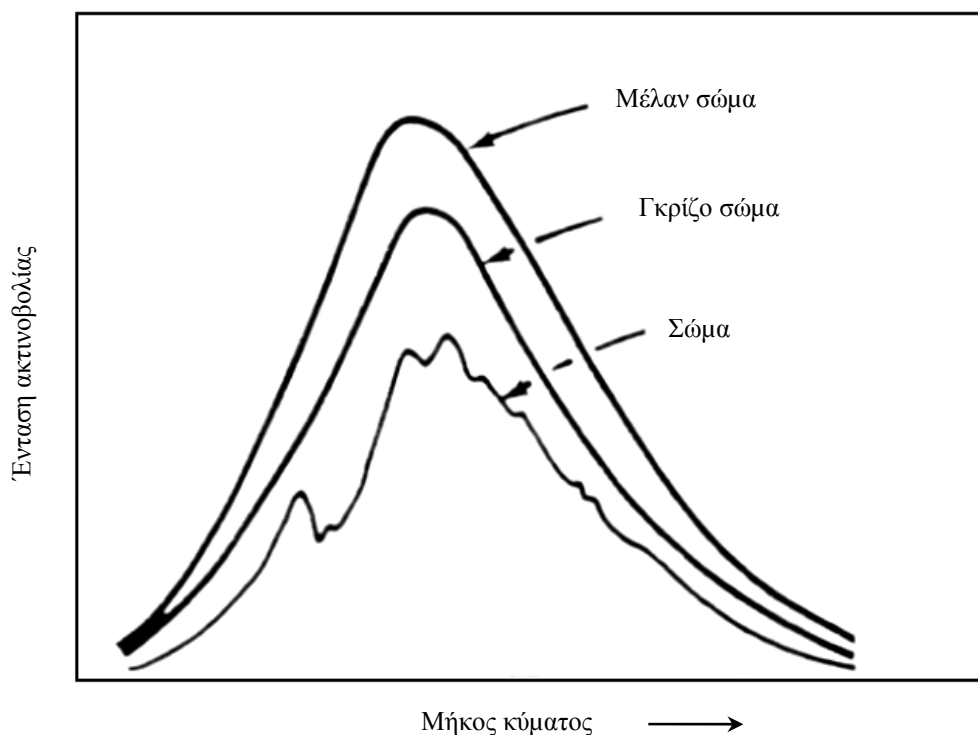
εάν μετρηθεί η $\varepsilon(\omega, T)$.

Η τιμή του ε είναι ένας αδιάστατος αριθμός, μικρότερος της μονάδας, που ορίζει το κλάσμα της ενέργειας που εκπέμπει το σώμα προς αυτήν που εκπέμπει ένα μέλαν σώμα που έχει την ίδια θερμοκρασία. Γενικά, η μελανότητα του σώματος εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα της ακτινοβολίας. Σώμα για το οποίο η μελανότητα δεν εξαρτάται από τη συχνότητα, ονομάζεται γκρίζο. Στο Σχ. 10.14 δίνονται η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, ενός γκρίζου σώματος και ενός σώματος με περίπλοκο φάσμα. Στον Πίνακα 10.2 δίνονται οι τιμές της μελανότητας διαφόρων μετάλλων. Αν αγνοηθεί η εξάρτηση της μελανότητας από τη συχνότητα, στις μετρήσεις θα παρεισφρήσει ένα μεγάλο σφάλμα. Αν ληφθεί υπόψη αυτή η εξάρτηση, τότε η διαδικασία μέτρησης της θερμοκρασίας γίνεται πολύ περίπλοκη. Η δυσκολία αυτή μπορεί να παρακαμφθεί εάν οι μετρήσεις γίνουν μέσω ενός οπτικού φίλτρου διέλευσης ζώνης στην περιοχή του ερυθρού φωτός.

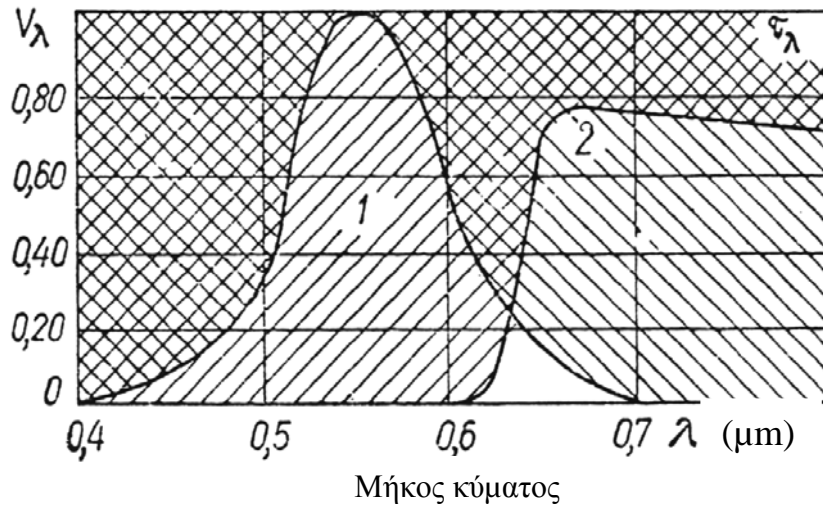
Πίνακας 10.2

Μέταλλο	ϵ (20 °C)
Cr	0,34
Co	0,36
Cu	0,10
Au	0,14
Fe	0,35
Mn	0,59
Mo	0,37
Ni	0,36
Pd	0,33
Pt	0,30
Rh	0,24
Ag	0,07
Ti	0,63
W	0,43

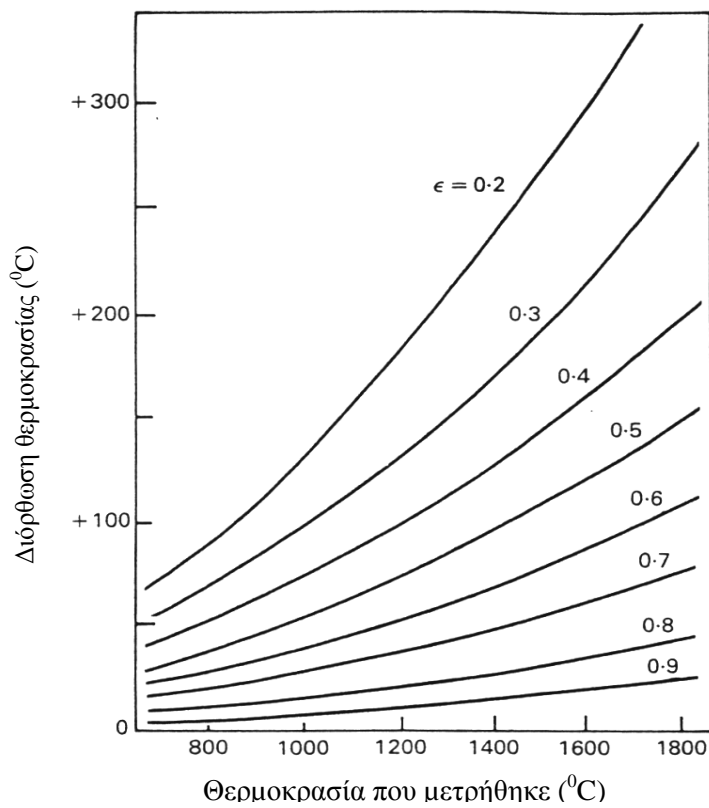
Με τον τρόπο αυτό οι μετρήσεις γίνονται σε ένα ορισμένο μήκος κύματος και το αποτέλεσμα της μέτρησης δεν εξαρτάται από τη φασματική κατανομή της ακτινοβολίας αφού έτσι και αλλιώς τα άλλα μήκη αποκόπτονται. Στα πυρόμετρα, το φίλτρο ζώνης δημιουργείται από ένα φίλτρο διέλευσης το κατώφλι του οποίου είναι περίπου τα 630 nm και από το μάτι του ανθρώπου, το κατώφλι του οποίου είναι 700 nm. Έτσι δημιουργείται ένα ισοδύναμο φίλτρο με μέγιστο στους 655 nm (Σχ. 10.15). Έτσι, το ερυθρό φίλτρο κάνει τη μέτρηση να είναι ανεξάρτητη από το αν το σώμα είναι γκρίζο ή όχι. Από την άλλη πλευρά, λόγω του ότι η μελανότητα του σώματος είναι μικρότερη της μονάδας, η ακτινοβολία που μετράται οδηγεί σε τιμές που είναι μικρότερες από την πραγματική θερμοκρασία του σώματος. Συνεπώς η μετρούμενη τιμή θα πρέπει να αυξηθεί καταλλήλως. Στο Σχ. 10.16, δίνεται ο διορθωτικός παράγοντας στην τιμή που μετρήθηκε, συναρτήσει της θερμοκρασίας και της μελανότητας του σώματος.

**Σχήμα 10.14.**

Καμπύλη ευαισθησίας του ματιού (1),
και διέλευσης του ερυθρού φίλτρου (2)



Σχήμα 10.15

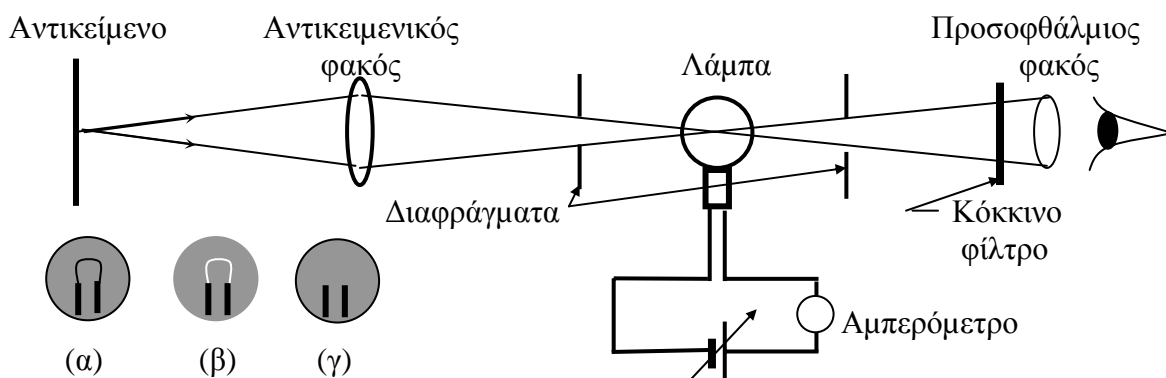


Σχήμα 10.16

Το οπτικό πυρόμετρο αόρατου νήματος

Τα πυρόμετρα στα οποία γίνεται η μέτρηση της ενέργειας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας ονομάζονται *ενεργειακά*. Έτσι, ενεργειακά είναι τα πυρόμετρα που εξετάσαμε πιο πάνω. Όμως η θερμοκρασία ενός σώματος μπορεί να μετρηθεί και από το χρώμα του (*χρωματική πυρομετρία*) όπως επίσης και από τη φωτεινότητά του. Ένα από τα πρώτα πυρόμετρα που κατασκεύασαν οι ερευνητές, είναι αυτό στο οποίο γίνεται σύγκριση της φωτεινότητας του αντικειμένου με αυτήν ενός νήματος βολφραμίου σε μία κοινή λάμπα πυρακτώσεως κενού. Το πυρόμετρο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως και σήμερα.

Στο Σχ. 10.17 δίνεται το σχεδιάγραμμα του πυρομέτρου αυτού του τύπου. Το οπτικό σύστημα του οργάνου σχηματίζει την εικόνα του νήματος της λάμπας πάνω στην επιφάνεια του θερμού σώματος. Το ανθρώπινο μάτι μπορεί να διακρίνει την παραμικρή διαφορά στη φωτεινότητα δύο αντικειμένων, φτάνει αυτά να βρίσκονται δίπλα το ένα στο άλλο. Στο πυρόμετρο, η φωτεινότητα του νήματος της λάμπας ρυθμίζεται με μεταβολή του ρεύματος που την τροφοδοτεί. Έτσι, όταν το νήμα της λάμπας έχει θερμοκρασία χαμηλότερη από αυτή του σώματος (Σχ. 10.17α), τότε το νήμα διακρίνεται σαφώς και η φωτεινότητά του είναι χαμηλότερη.



Σχήμα 10.17.

Στην αντίθετη περίπτωση, το νήμα και πάλι διακρίνεται (Σχ. 10.17β) αλλά με φωτεινότητα που είναι υψηλότερη από αυτήν του σώματος. Ρυθμίζοντας τη φωτεινότητα του νήματος μπορεί να επιτύχει κανείς τη συνθήκη στην οποία το νήμα παύει να είναι ορατό (Σχ. 10.17γ). Υπό τις συνθήκες αυτές, οι φωτεινότητες του νήματος και του σώματος είναι ίσες. Η ανάγνωση της τιμής της θερμοκρασίας γίνεται από την καμπύλη ή πίνακα που παρέχουν τις τιμές της θερμοκρασίας του νήματος συναρτήσει του ρεύματος θέρμανσης. Στο βολφράμιο, η καμπύλη αυτή, όπως και η μελανότητά του, είναι μελετημένα με μεγάλη ακρίβεια.