

## ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΑΣΚΗΣΕΩΝ: 1 , 2 , 3 και 4

### Στόχος:

Να αναδειχθεί ο τρόπος με τον οποίο η θερμοκρασία επηρεάζει την αγωγιμότητα (αντίσταση) και διάφορων υλικών και κατ' επέκταση ηλεκτρονικών διατάξεων.

Διαφορετικοί τύποι υλικών αντιδρούν διαφορετικά στις αλλαγές της θερμοκρασίας. Ένας ηλεκτρονικός μηχανικός σχεδιασμού κυκλωμάτων πρέπει να είναι σε θέση να προβλέψει αν η αγωγιμότητα του κάθε υλικού σε μια διάταξη, θα είναι εντός ενός αποδεκτού θερμοκρασιακού εύρους κανονικής λειτουργίας ενός ηλεκτρονικού στοιχείου ή διάταξης. Σε αυτές τις εργαστηριακές ασκήσεις θα αναδειχθεί η διαφορά της συμπεριφοράς μετάλλων και ημιαγωγών, στις μεταβολές της θερμοκρασίας.

### Περίπτωση μετάλλων:

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν μια συνεχή σχεδόν γραμμική αύξηση της ειδικής αντίστασης, όταν η θερμοκρασία αυξάνει.

Αυτή η εξάρτηση οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, προκαλεί αύξηση του πλάτους των θερμικών ταλαντώσεων των ατόμων του μεταλλικού κρυσταλλικού πλέγματος, και το τετράγωνο του πλάτους  $\alpha$  των ταλαντώσεων είναι ανάλογο της θερμοκρασίας  $T$  ( $\alpha^2 \propto T$ ). Το τετράγωνο του πλάτους  $\alpha$  ακολουθεί νόμο

$\alpha^2 \propto \frac{1}{\lambda}$  όπου  $\lambda$  η μέση ελεύθερη διαδρομή των ελευθέρων ηλεκτρονίων. Από τα ανωτέρω προκύπτει ότι:  $1/\lambda \propto T$ . Η ευκινησία  $\mu$  των ελευθέρων ηλεκτρονίων είναι ανάλογη της μέσης ελεύθερης διαδρομής  $\lambda$  ( $\mu \propto \lambda$ ) και ως εκ τούτου θα προκύπτει  $\mu \propto 1/T$ . Σύμφωνα με τη σχέση  $\rho = \frac{1}{q \cdot n \cdot \mu}$ , θα προκύπτει μια σχέση αναλογίας

μεταξύ της ειδικής αντίστασης  $\rho$  και της απόλυτης θερμοκρασίας  $T$ , με δεδομένο ότι στα μέταλλα η αύξηση της θερμοκρασίας δεν επηρεάζει πρακτικά την συγκέντρωση  $n$  των ελευθέρων ηλεκτρονίων. Συνεπώς στην περίπτωση των μετάλλων η μοναδική επιρροή της θερμοκρασίας στην ηλεκτρική αγωγιμότητα και ειδική αντίσταση, εισάγεται μέσω της εξάρτησης της ευκινησίας των ελευθέρων ηλεκτρονίων από την θερμοκρασία.

Σε στενά θερμοκρασιακά όρια και σε θερμοκρασίες πλησίον της θερμοκρασίας δωματίου μπορούμε να δεχτούμε για τα μέταλλα έναν γραμμικό νόμο εξάρτησης της ειδικής αντίστασης με τη θερμοκρασία. Με καλή προσέγγιση μπορούμε να γράψουμε ένα νόμο της μορφής:

$$\rho(T) = \rho_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] \quad (1)$$

ή

$$\rho(\vartheta) = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \vartheta) \quad (2)$$

όπου  $\rho_0$  η τιμή της ειδικής αντίστασης σε μια θερμοκρασία αναφοράς  $T_0$ , (συνήθως λαμβάνεται η θερμοκρασία 273K ή 0°C) και  $\alpha$  ένας θετικός συντελεστής, που φέρεται με το όνομα θερμικός συντελεστής αντίστασης.

Αντίστοιχα αν ληφθεί ασήμαντη η μεταβολή των γεωμετρικών στοιχείων με την θερμοκρασία ενός μεταλλικού σύρματος η αντίστασή του  $R$  με καλή προσέγγιση μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις:

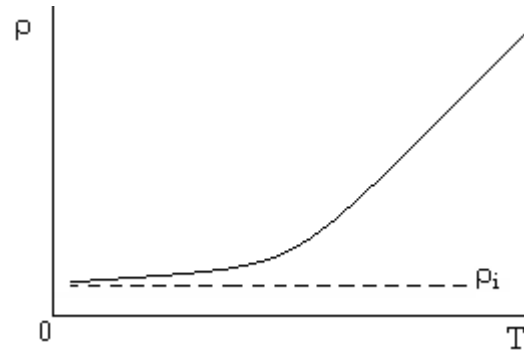
$$R(T) = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] \quad (3)$$

ή

$$R(\vartheta) = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \vartheta) \quad (4)$$

με  $R_0$  η τιμή της αντίστασης στη θερμοκρασία 273K ή 0°C.

Στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες και ιδιαίτερα σε εκείνες πολύ κοντά στο απόλυτο μηδέν ( $T=0K$ ), παρατηρείται πρακτικά σταθερή τιμή της ειδικής αντίστασης  $\rho$ , δεδομένου ότι έχει σταματήσει κάθε θερμική κίνηση (ταλάντωση) των πλεγματικών ατόμων. Δηλαδή έχουμε  $\rho = \rho_i = \text{σταθ.}$ . Η τιμή της  $\rho_i$  φέρεται με το όνομα **παραμένουσα ειδική αντίσταση** και είναι πρακτικά σταθερή σε όλες τις θερμοκρασίες (διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα 1). Επίσης η τιμή της παραμένουσας ειδικής αντίστασης, διαφέρει από μέταλλο σε μέταλλο. Όταν το κρυσταλλικό πλέγμα του μετάλλου δεν παρουσιάζει σημαντική συγκέντρωση πλεγματικών ατελειών και προσμίξεων, τότε η τιμή της  $\rho_i$  μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά ανεξάρτητη από την προαναφερθείσα συγκέντρωση.

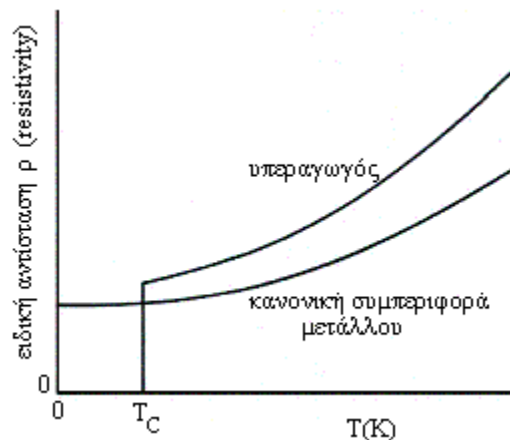


Σχήμα 1. Η ειδική αντίσταση μετάλλων σε χαμηλές θερμοκρασίες σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας

### Περίπτωση υπεραγωγών και το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας:

Πειραματικά παρατηρήθηκε ότι σε ορισμένα υλικά η ειδική αντίσταση σε μερικούς βαθμούς πάνω από το απόλυτο μηδέν ( $T=0K$ ), γίνεται απότομα μηδενική (βλέπε σχήμα 2). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται υπεραγωγιμότητα και η θερμοκρασία στην οποία στην οποία πραγματοποιείται ο μηδενισμός της ειδικής αντίστασης, ονομάζεται **κρίσιμη θερμοκρασία** και συμβολίζεται με  $T_C$ . Τα υλικά που βρίσκονται στην κατάσταση της υπεραγωγιμότητας ονομάζονται υπεραγωγοί. Το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας παρατηρήθηκε σε υλικά που έχουν αρκετά μεγάλες τιμές ειδικής αντίστασης και οι κρίσιμες θερμοκρασίες κυμαίνονται από 0 έως 18K.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη στο υλικό των υπεραγωγών ακόμη και ίχνους



Σχήμα 2. Η συμπεριφορά της ειδικής αντίστασης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία στους υπεραγωγούς και σε μέταλλα με συνήθη (κανονική) συμπεριφορά.

ποσοτήτων ξένων μαγνητικών στοιχείων χαμηλώνουν αισθητά την κρίσιμη θερμοκρασία.

Στη δεκαετία του 80 είχαμε την ανακάλυψη των υπεραγωγών υψηλής θερμοκρασίας των οποίων η κρίσιμη θερμοκρασία  $T_C$ , εντοπιζόταν πάνω από την θερμοκρασία του υγρού αζώτου (77K). Οι υψηλής θερμοκρασίας υπεραγωγοί (high-temperature superconductors HTS) γνωστοί ως perovskites είναι ενώσεις μιγμάτων μεταλλικών οξειδίων και παρουσιάζουν μηχανικές και φυσικές ιδιότητες κεραμικών υλικών. Χαρακτηριστικοί κεραμικοί υπεραγωγοί είναι οι ενώσεις  $YBa_2Cu_3O_7$  που παρουσιάζει το φαινόμενο της υπεραγωγιμότητας στη θερμοκρασία των 90K περίπου και δομές όπως η  $CaBa_2Cu_2HgO_6$  με κρίσιμη θερμοκρασία πάνω από 133K.

### Περίπτωση ημιαγωγών:

Εξετάζεται η περίπτωση ενδογενών ημιαγωγών. Δηλαδή των ημιαγωγών χωρίς προσμίξεις δοτών (n- τύπου), ή αποδεκτών (p - τύπου). Η εξάρτηση της αγωγιμότητας  $\sigma_i$  ως προς την θερμοκρασία  $T$ , σύμφωνα με την σχέση:  $\sigma_i = q \cdot (\mu_n + \mu_p) \cdot n_i$ , θα είναι αποτέλεσμα της εξάρτησης της ενδογενούς συγκέντρωσης των φορέων  $n_i$  από τη

θερμοκρασία (σχέση:  $n_i = \sqrt{A} \cdot T^{3/2} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$ ) και από την εξάρτηση των

ευκινησιών ηλεκτρονίων και οπών από τη θερμοκρασία. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι στους ενδογενείς ημιαγωγούς, οι ευκινησίες  $\mu_n$  των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας και  $\mu_p$  των οπών, μειώνονται αυξανομένης της θερμοκρασίας με ένα νόμο της μορφής:  $T^{-m}$ , όπου  $m$  εκθέτης που λαμβάνει τιμές μεταξύ 1.5 έως 2.7, ενώ η ακριβής τιμή του εξαρτάται από το είδος του κρυστάλλου και από είδος των φορέων. Με βάση ανωτέρω προτείνεται η ακόλουθη σχέση:

$$\sigma_i = \text{σταθερά} \cdot T^b \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right), \quad (5)$$

με τον εκθέτη  $b$  να έχει τιμή που κυμαίνεται γύρω από το  $-1$ . Επειδή ο εκθετικός όρος  $\exp(-E_g/2kT)$  είναι πολύ πιο ευαίσθητος στις μεταβολές της θερμοκρασίας σε σχέση με τον όρο  $T^b$ , με καλή προσέγγιση προτείνεται για την εξάρτηση της ειδικής ενδογενούς αγωγιμότητας  $\sigma_i$  από την θερμοκρασία η ακόλουθη σχέση:

$$\sigma_i = c \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (6)$$

όπου  $c$  μια ποσότητα, που πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί ανεξάρτητη της θερμοκρασίας. Με βάση την ανωτέρω σχέση, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι αυξανομένης της θερμοκρασίας η ειδική αγωγιμότητα ενδογενούς ημιαγωγού αυξάνεται έντονα με έναν κατά προσέγγιση εκθετικό νόμο. Η ανωτέρω σχέση  $\sigma_i - T$  μπορεί να τύχει πειραματικής επαλήθευσης για ένα περιορισμένο θερμοκρασιακό εύρος. Αν η σχέση 6 γραφεί για δυο θερμοκρασίες: την  $T_0$  (θερμοκρασία αναφοράς π.χ. 300K) και μια άλλη  $T$ , τότε εύκολα προκύπτει η ακόλουθη έκφραση:

$$\sigma_i(T) = \sigma_i(T_0) \cdot \exp\left[-\frac{E_g}{2k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (7)$$

Όσον αφορά την ειδική αντίσταση  $\rho_i$  των ενδογενών ημιαγωγών, επειδή  $\rho_i = 1/\sigma_i$  η ειδική αντίσταση  $\rho_i$  αυξανομένης της θερμοκρασίας, θα υφίσταται μια έντονη εκθετική μείωση. Σε αναλογία με τη σχέση 7, μπορούμε να γράψουμε την ακόλουθη σχέση:

$$\rho_i(T) = \rho_i(T_0) \cdot \exp\left[\frac{E_g}{2k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (8)$$

Ανάλογη σχέση με την 8 θα διέπει και την αντίσταση R δεδομένων διαστάσεων (μήκους  $\ell$  και διατομής A) ενδογενούς ημιαγωγού. Δεδομένου ότι  $R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}$  καθώς και ότι η επιρροή της θερμοκρασίας στις γεωμετρικές διαστάσεις του δοκιμίου μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα θα έχουμε:

$$R(T) = R(T_0) \cdot \exp\left[\frac{E_g}{2k}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (9)$$

### Θερμικός συντελεστής αντίστασης υλικών:

Γενικά για οποιοδήποτε υλικό, ο θερμικός συντελεστής αντίστασης σε μια δεδομένη θερμοκρασία ορίζεται ως εξής:

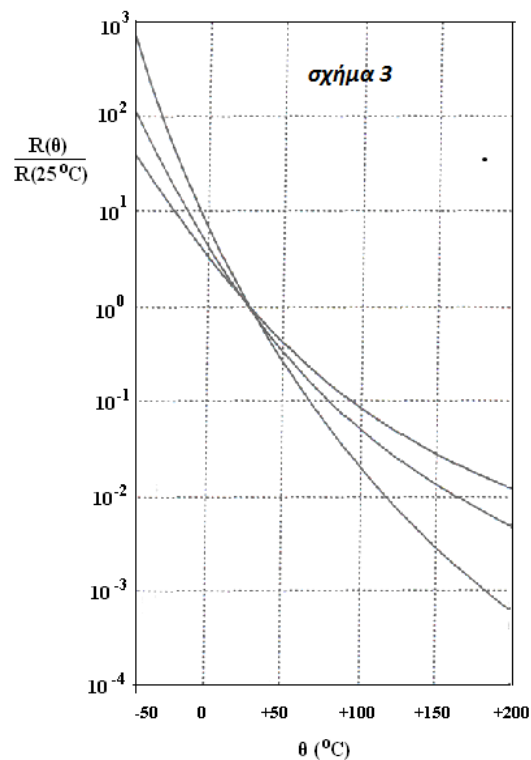
$$\alpha = \frac{\Delta R}{R} \cdot \frac{1}{\Delta T} \quad (10)$$

όπου  $\Delta R$  η μεταβολή της αντίστασης που δημιουργεί μια στοιχειώδης αύξηση της θερμοκρασίας από την T στην T+ $\Delta T$  και R η τιμή της αντίστασης στη θερμοκρασία T.

### Το θερμίστορ (thermistor):

Την ιδιότητα των ημιαγωγών, που εκδηλώνεται έντονη μείωση της αντίστασης τους, όταν παρατηρείται αύξηση της θερμοκρασίας, την εκμεταλλευόμαστε σε αρκετές εφαρμογές, κατασκευάζοντας ειδικές αντιστάσεις, που φέρονται με το όνομα **θερμίστορ (thermistor)**.

Η εξάρτηση της αντίστασης R ενός θερμίστορ **NTC** (Negative Temperature Coefficient, αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας), από την απόλυτη θερμοκρασία T, περιγράφεται από το ακόλουθο εκθετικό νόμο:



$$R = R_0 \cdot \exp\left[\beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (11)$$

όπου R η αντίσταση του θερμίστορ στη θερμοκρασία T και R<sub>0</sub> η ονομαστική τιμή της αντίστασης του θερμίστορ που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία T<sub>0</sub>=298K (25<sup>0</sup>C). Η σταθερά β είναι ένας συντελεστής χαρακτηριστικός του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένο το θερμίστορ (συντελεστής υλικού) και εκφράζεται σε μονάδες αντιστρόφου θερμοκρασίας (K<sup>-1</sup>). Στο σχήμα 3 έχουν χαραχθεί οι χαρακτηριστικές τριών διαφορετικών NTC θερμίστορ (διαφόρων υλικών), σε ημι-λογαριθμικό διάγραμμα. Ο ημι-λογαριθμικός άξονας αντιστοιχεί στο πηλίκο R/R<sub>0</sub>. Το χαρακτηριστικό αυτών των καμπυλών είναι ότι τα θερμίστορ διαθέτουν ένα πολύ μεγάλο και με αρνητικές τιμές θερμοκό συντελεστή αντίστασης.

### Η χαρακτηριστική έντασης ρεύματος - τάσης (I-V) ενός thermistor:

Στο σχήμα 4 έχει σχεδιαστεί ύστερα από λήψη μετρήσεων, η χαρακτηριστική I-V ενός θερμίστορ του εμπορίου ονομαστικής τιμής 120Ω. Όταν το θερμίστορ διαρρέεται από χαμηλά ρεύματα παρατηρείται μια σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ του ρεύματος και της τάσης, γεγονός που σημαίνει

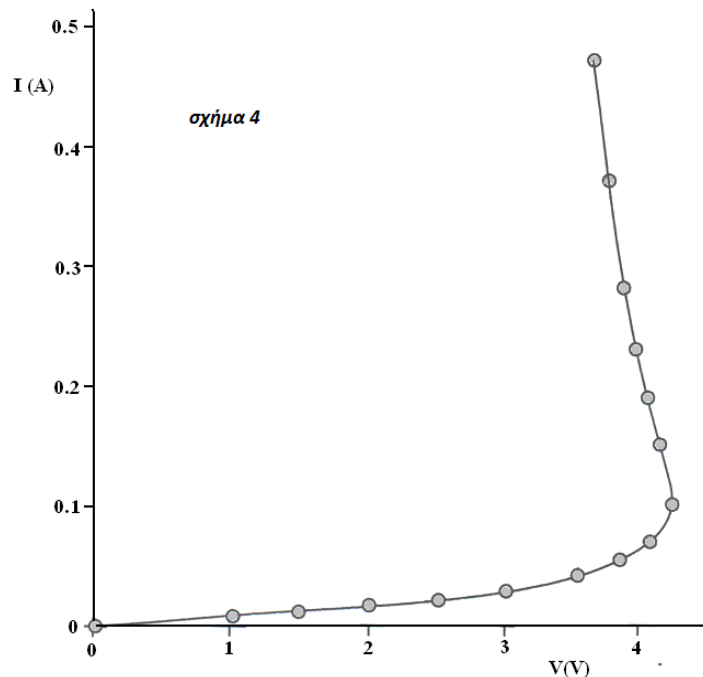
ότι η αντίσταση του ελάχιστα μεταβάλλεται και διατηρεί μια τιμή παραπλήσια εκείνη της ονομαστικής του τιμής, που αντιστοιχεί στη θερμοκρασία των 25<sup>0</sup>C. Για το συγκεκριμένο θερμίστορ η ωμική συμπεριφορά φαίνεται να εκδηλώνεται για τιμές τάσης μικρότερες από 2V. Για μεγαλύτερες τιμές έντασης ρεύματος, παράγεται αρκετή θερμότητα, έτσι ώστε να αυξάνεται αισθητά η θερμοκρασία του θερμίστορ, πάνω από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Αποτέλεσμα είναι λόγω της ημιαγώγιμης συμπεριφοράς του, η αντίσταση του να μειώνεται και να διαρρέεται από ακόμη περισσότερο ρεύμα. Κάτω από τέτοιες εργαστηριακές συνθήκες η θερμοκρασία του θερμίστορ μπορεί να αυξηθεί κατά 100<sup>0</sup>C ή ακόμη και 200<sup>0</sup>C και η αντίσταση του να μειωθεί τρεις τάξεις μεγέθους.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό γνώρισμα των θερμίστορ είναι ότι η ισχύς που καταναλώνουν ακολουθεί ένα γραμμικό νόμο με την θερμοκρασία που έχει αποκτήσει το θερμίστορ στο αντίστοιχο σημείο λειτουργίας του. Έχουμε δηλαδή:

$$P = I \cdot V = c \cdot (T - T_0) \quad (12)$$

όπου c σταθερά που εξαρτάται από το τύπο του θερμίστορ.

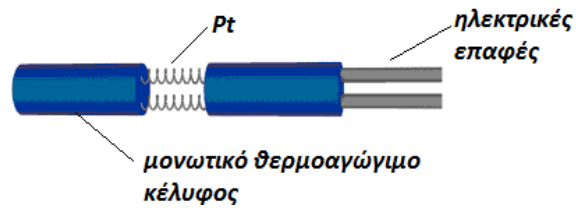


# ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

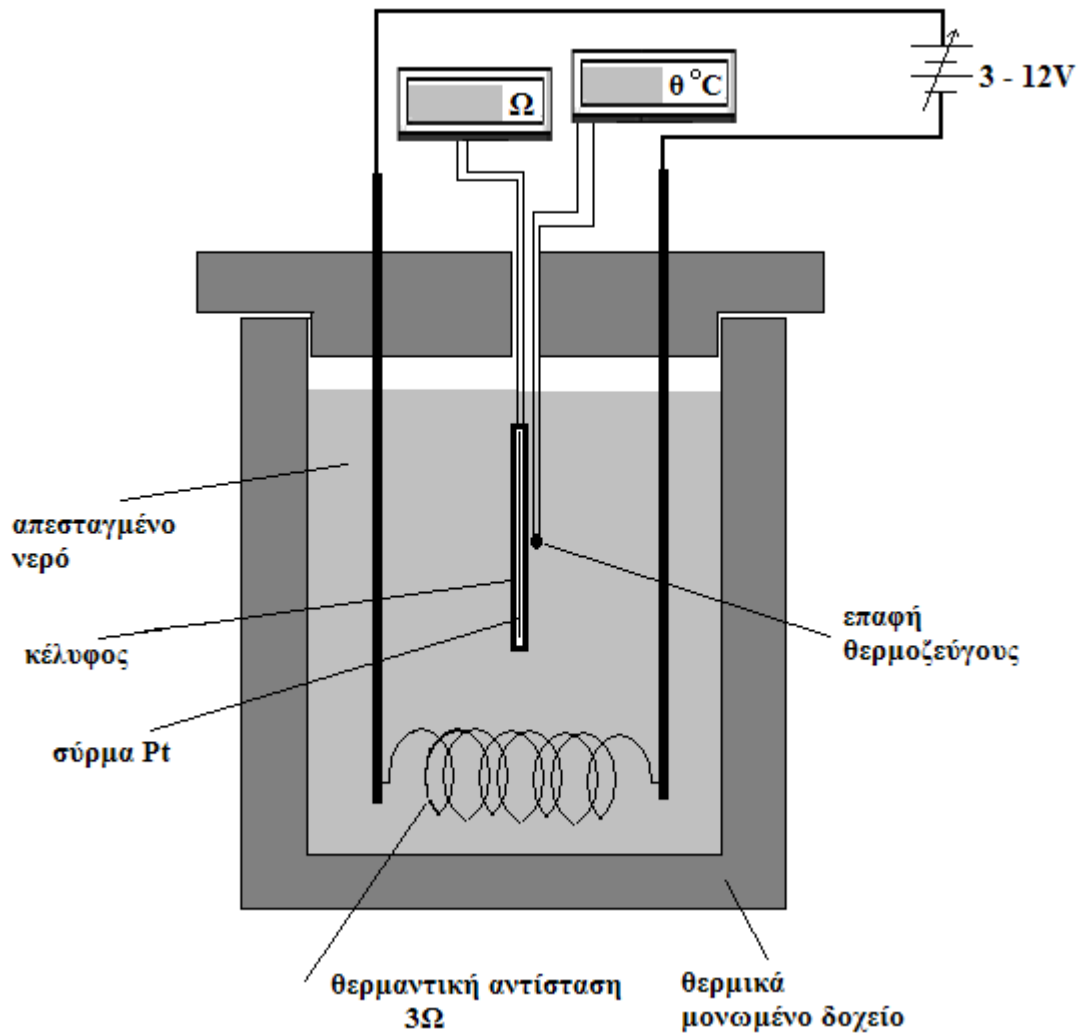
## ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Υπό δοκιμή υλικό (μέταλλο):

Αντίσταση λεπτού σύρματος λευκόχρυσου (πλατίνας, Pt).



Διάταξη μετρήσεων:



Σχήμα 5

Η αντίσταση Pt εισάγεται σε περιβάλλον αποσταγμένου νερού εντός θερμικά μονωμένου μεταλλικού δοχείου αλουμινίου σχήμα 5. Το νερό θερμαίνεται με τη βοήθεια θερμαντικής αντίστασης (θερμαντικού σύρματος) 3Ω. Συνεπώς η υπό δοκιμή αντίσταση Pt αποκτά την εκάστοτε θερμοκρασία του νερού η οποία μετρείται με τη βοήθεια θερμοζεύγους. Η μέτρηση της αντίστασης Pt πραγματοποιείται με ένα πολύμετρο σε χρήση ωμομέτρου. Πριν την λήψη κάθε μέτρησης R και θ, απαιτείται ανάδευση του νερού μέσω ενός αναδευτήρα που δεν έχει σχεδιαστεί στην εικόνα της πειραματικής διάταξης.

## ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

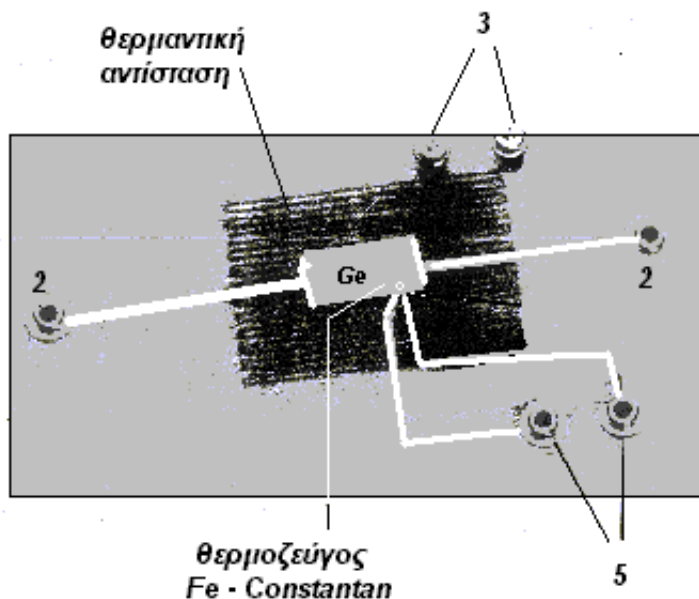
### Υπό δοκιμή υλικό (ημιαγωγός):

Δοκίμιο γερμανίου (Ge) υψηλής καθαρότητας, το οποίο παρουσιάζει ενδογενή συμπεριφορά με διαστάσεις: 20mm x 10mm x 1mm

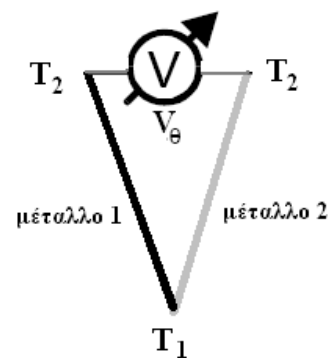
### Διάταξη μετρήσεων:

Το δοκίμιο Ge είναι προσαρμοσμένο σε θερμαινόμενη πλακέτα, η οποία θερμαίνεται με film αντίστασης (βλέπε σχήμα 6). Η αντίσταση αυτή τροφοδοτείται με συνεχή τάση από 0 έως 6V (ακροδέκτες 3), και το δοκίμιο του Ge μπορεί να αποκτήσει θερμοκρασίες αρκετούς βαθμούς πάνω από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του ημιαγωγού, χρησιμοποιούμε ένα θερμοζεύγος Cu-Constantan (Η constantan είναι κράμα χαλκού –νικελίου). Η μέτρηση της θερμοκρασίας γίνεται με έμμεσο τρόπο αφού πρώτα μετρηθεί η θερμοηλεκτρική τάση  $V_{\theta}$  (ακροδέκτες 5).



σχήμα 6



σχήμα 7

Σύμφωνα με το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο (Seebeck), όταν η επαφή δυο αγωγών από διαφορετικά μέταλλα βρίσκεται σε διαφορετική θερμοκρασία από τα δυο άκρα τους, τότε

εμφανίζεται ηλεκτρική τάση  $V_{\theta}$  (σχήμα 7). Η σχέση μεταξύ της θερμοηλεκτρικής τάσης και της διαφοράς θερμοκρασίας δεν είναι γραμμική. Εντούτοις σε μια σχετικά μικρή περιοχή θερμοκρασιών η θερμοηλεκτρική τάση δίνεται από την σχέση:

$$V_{\theta} = \varepsilon \cdot \Delta T$$

όπου  $\varepsilon$  η ευαισθησία τον θερμοζεύγους. Του συγκεκριμένου θερμοζεύγους η ευαισθησία είναι:

$$\varepsilon = 40 \mu\text{V/K} \text{ ή } 0.04 \text{mV/K}.$$

Αυτό σημαίνει ότι όταν η θερμοκρασία της επαφής του θερμοζεύγους αυξηθεί κατά 1K, τότε στο θερμοζεύγος αναπτύσσεται πρόσθετη θερμοτάση 40 $\mu$ V. Αν  $T_{\pi}$  είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος, τότε η απόλυτη θερμοκρασία  $T$  που θα έχει ο κρύσταλλος του Ge, όταν στα άκρα του θερμοζεύγους αναπτύσσεται θερμοτάση  $V_{\theta}$ , θα υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$T(K) = T_{\pi} + \frac{V_{\theta}}{\varepsilon} = T_{\pi} + \frac{V_{\theta}(mV)}{0.04 \frac{mV}{K}} = T_{\pi} + 25 \frac{K}{mV} \cdot V_{\theta}(mV) \quad (3.10)$$

Η μέτρηση της αντίστασης  $R$  του δοκιμίου πραγματοποιείται με ένα πολύμετρο σε χρήση ομομέτρου που συνδέεται (ακροδέκτες 2) στα άκρα του δοκιμίου (σχήμα 2).

### **Χαρακτηριστικά των *thermistors***

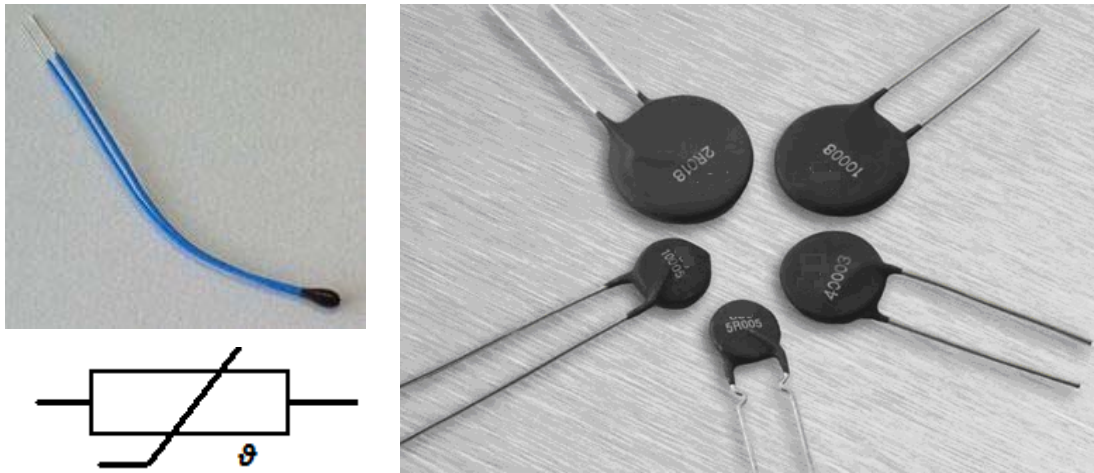
Διακρίνουμε δυο βασικές κατηγορίες θερμίστορ: τα **NTC** (Negative Temperature Coefficient, αρνητικού συντελεστή θερμοκρασίας), στα οποία παρατηρείται μείωση της αντίστασης τους, όταν η θερμοκρασία αυξάνεται, και τα **PTC** (Positive Temperature Coefficient, θετικού συντελεστή θερμοκρασίας) στα οποία παρατηρείται αύξηση της αντίστασης τους, όταν η θερμοκρασία αυξάνεται.

Τα NTC θερμίστορ κατασκευάζονται από οξειδία διαφόρων στοιχείων όπως για παράδειγμα τα οξειδία του χρωμίου (Cr), του μαγγανίου (Mn), του σιδήρου (Fe), του χαλκού (Cu) ή του νικελίου (Ni). Τα οξειδία αυτά χαρακτηρίζονται από μεγάλη ειδική αντίσταση, ενώ κάτω από ορισμένες συνθήκες είναι δυνατόν να μετατραπούν σε ημιαγωγούς τύπου p ή n. Τα οξειδία αφού κονιοποιηθούν ανακατεύονται με συγκρατητική ύλη, τοποθετούνται υπό καθεστώς πίεσης σε ειδικά καλούπια, ψήνονται σε ειδικούς φούρνους όπου σε υψηλή θερμοκρασία γίνεται σύντηξη του οξειδίου. Στη συνέχεια τοποθετούνται οι ακροδέκτες τους, επιστρώνονται με μονωτικό υλικό, βάφονται με ειδικά χρώματα που δείχνουν τα χαρακτηριστικά τους και ακολούθως παρέχονται προς χρήση στο εμπόριο.

Τα θερμίστορ PTC (Positive Temperature Coefficient, θετικού συντελεστή θερμοκρασίας) χαρακτηρίζονται από τον υψηλό θετικό συντελεστή θερμοκρασίας δηλαδή από την αύξηση της τιμής της αντίστασης τους με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό βέβαια συμβαίνει μόνο για ορισμένες περιοχές θερμοκρασίας, αφού για άλλες περιοχές ο συντελεστής είναι αρνητικός. Τα υλικά κατασκευής των PTC είναι μείγματα ανθρακικού βαρίου ή οξειδία στροντίου και τιτανίου τα οποία ανακατεύονται μ' άλλα υλικά μαζί με συγκρατητική ύλη. Το υλικό μπαίνει σε καλούπια, θερμαίνεται, προστίθενται οι ακροδέκτες και τα διάφορα χρώματα και δίνονται στο εμπόριο.

Όπως έχει προαναφερθεί τα θερμίστορ χαρακτηρίζονται από πολύ μεγάλο και συνήθως αρνητικό θερμικό συντελεστή αντίστασης. Υπάρχουν θερμίστορ που σε θερμοκρασίες δωματίου παρατηρείται μείωση έως και 6% της αντίστασης τους για αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C. Το γεγονός ότι τα θερμίστορ παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία στις μεταβολές της θερμοκρασίας, τα καθιστά χρήσιμα σε εφαρμογές που σχετίζονται με ακριβείς μετρήσεις και ελέγχου, όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία. Τα θερμοκρασιακά όρια στα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα θερμίστορ είναι από -100°C έως +300°C.

Τα θερμίστορ που κυκλοφορούν στο εμπόριο έχουν σχήμα χάνδρας ή δίσκου (σχήμα 8) και φέρουν δυο ωμικές επαφές ακροδεκτών και η ονομαστική τιμή της αντίστασης τους αναφέρεται στη θερμοκρασία των 25°C. Τα διαθέσιμα στο εμπόριο θερμίστορ έχουν ονομαστικές τιμές αντιστάσεων που ποικίλουν από 0.5Ω έως 75Ω, ενώ οι διαστάσεις των μπορεί να είναι αρκετά μικρές. Τα μικρότερα σε διαστάσεις θερμίστορ είναι εκείνα που έχουν σχήμα χάνδρας διαμέτρου από 0.15mm έως 1.25mm. Το κυκλωματικό σύμβολο του θερμίστορ παρουσιάζεται στο σχήμα 8.



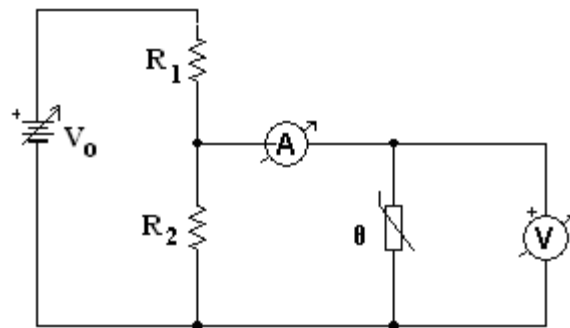
σχήμα 4

### Κύκλωμα για λήψη χαρακτηριστικής I-V ενός θερμίστορ

Το θερμίστορ, τροφοδοτείται μέσω διαιρέτη τάσης των αντιστάσεων  $R_1$  και  $R_2$  (σχήμα 9).

Για διάφορες τιμές της τάσης τροφοδοσίας  $V_0$ , από 1V έως 12V, περίπου με βήμα 1V, καταγράφονται οι ενδείξεις του αμπερομέτρου και του βολτομέτρου (ένταση ρεύματος  $I$  και αντίστοιχη τιμή τάσης  $V$  που επικρατεί στα άκρα του θερμίστορ).

Πριν τη λήψη και καταγραφή των μετρήσεων και ιδιαίτερα όταν η ένταση



σχήμα 9

του ρεύματος είναι μεγαλύτερη των 50mA, απαιτείται ένας ικανός χρόνος αποκατάστασης σε πρακτικά σταθερές τιμές της έντασης του ρεύματος και της τάσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι απαιτείται ένας ικανός χρόνος θερμικής ισορροπίας του θερμίστορ. Ο χρόνος αυτός μπορεί να κυμαίνεται από 5min μέχρι 10min.