

Εργαστηριακή Άσκηση I

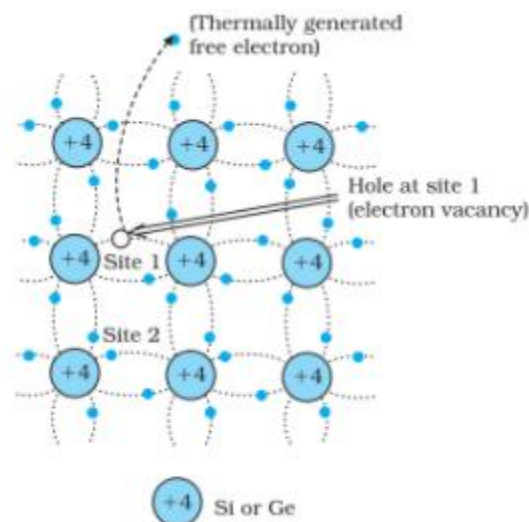
Ενεργειακό Χάσμα Ημιαγωγού

Σκοπός της άσκησης είναι ο πειραματικός προσδιορισμός του ενεργειακού χάσματος ενός ενδογενούς ημιαγωγού μονοκρυσταλλικού γερμανίου (Ge).

Φυσικές έννοιες

Για το σχηματισμό του κρυστάλλου γερμανίου, κάθε άτομο (σθένος 4) συνδέεται μέσω τεσσάρων ομοιοπολικών δεσμών με τέσσερα γειτονικά του άτομα. Στη θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός (0 K) όλα τα ηλεκτρόνια σθένους είναι δέσμια, επομένως ο κρύσταλλος είναι μονωτής. Όταν θερμαίνεται ο κρύσταλλος, λόγω της θερμικής κίνησης σπάζουν κάποιοι δεσμοί. Το ενεργειακό χάσμα E_g είναι η ενέργεια που απαιτείται για το σπάσιμο ενός ομοιοπολικού δεσμού στον κρύσταλλο. Κάθε δεσμός που σπάζει, ελευθερώνει ένα ηλεκτρόνιο αφήνοντας πίσω του μία κενή θέση στον αντίστοιχο δεσμό που φέρει ενεργό θετικό φορτίο και ονομάζεται **οπή** (Σχήμα 1).

Ένα ηλεκτρόνιο από ένα παρακείμενο δεσμό μπορεί να γεμίσει αυτό το κενό με αποτέλεσμα το ίδιο το κενό να μεταφερθεί σε μια γειτονική θέση. Μέσω αυτού του μηχανισμού της διαδοχικής πλήρωσης του κενού από γειτονικά ηλεκτρόνια αυτό μετακινείται. Το μετακινούμενο κενό, δηλαδή η οπή, συμπεριφέρεται ακριβώς όπως ένα σωματίδιο με θετικό φορτίο ίσο με το στοιχειώδες φορτίο και κινείται σε αντίθετη κατεύθυνση από τα ηλεκτρόνια παρουσία ηλεκτρικού πεδίου.



Σχήμα 1. Σχηματισμός ζεύγους ηλεκτρονίου–οπής σε ενδογενή ημιαγωγό γερμανίου.

Τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν από το σπάσιμο των δεσμών, εξαιτίας της θερμικής ενέργειας, μεταφέρονται στη ζώνη αγωγιμότητας και **είναι ελεύθερα να περιπλανηθούν σε ολόκληρο τον όγκο του υλικού**. Κατά συνέπεια τα ηλεκτρόνια αυτά συνδράμουν στην αγωγιμότητα του υλικού. Οι οπές που δημιουργούνται στη ζώνη σθένους **μπορούν και αυτές να μεταφερθούν σε όλο τον όγκο του υλικού** και να συνδράμουν έτσι στην συνολική αγωγιμότητα του υλικού, καθώς μετακινούνται μέσω του μηχανισμού που περιγράφηκε παραπάνω.

Καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία διεγείρονται όλο και περισσότερα ηλεκτρόνια με αποτέλεσμα να αυξάνεται η συγκέντρωση των φορέων φορτίου και επομένως να αυξάνεται η αγωγιμότητα. Η εξάρτηση της αγωγιμότητας από τη θερμοκρασία περιγράφεται από τη σχέση

$$\sigma = \sigma_0 \exp \left\{ -\frac{E_g}{2kT} \right\} \quad (1)$$

Όπου σ_0 είναι η αγωγιμότητα σε άπειρη θερμοκρασία, E_g είναι το ενεργειακό χάσμα, k είναι η σταθερά Boltzman (1.38×10^{-23} J/K) και T η απόλυτη θερμοκρασία. Όσο μεγαλύτερο είναι το ενεργειακό χάσμα, τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι η θερμοκρασία ώστε τα ηλεκτρόνια να αποκτήσουν την απαραίτητη ενέργεια ($\geq E_g$) και να μεταβούν στη ζώνη αγωγιμότητας. **Το ενεργειακό χάσμα είναι ένα φυσικό μέγεθος που χαρακτηρίζει κάθε ημιαγωγικό υλικό.**

Η αγωγιμότητα είναι ένα φυσικό μέγεθος το οποίο περιγράφει την ικανότητα ενός υλικού να επιτρέπει τη μετακίνηση φορέων φορτίου μέσα από τον όγκο του. Κατά συνέπεια είναι μια ιδιότητα που χαρακτηρίζει το κάθε υλικό και η εξάρτησή της από τη θερμοκρασία περιγράφεται από την παραπάνω σχέση. **Θα πρέπει να τονιστεί σε αυτό το σημείο ότι η σχέση αυτή ισχύει μόνο για ημιαγωγούς και εκφράζει το γεγονός ότι η αγωγιμότητα αυξάνει καθώς αυξάνει η θερμοκρασία σε αντίθεση με έναν αγωγό στον οποίο η αγωγιμότητα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.**

Η αντίσταση είναι ένα μέγεθος το οποίο εξαρτάται από το είδος του υλικού, δηλαδή την αγωγιμότητά του, σ , αλλά και από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υλικού, το μήκος l και την επιφάνεια διατομής A . Η αντίσταση ενός ημιαγωγού παρέχεται από την ίδια σχέση που ισχύει και για έναν αγωγό

$$R = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{A} \quad (2)$$

Μακροσκοπικά, όταν εφαρμόζεται σε ένα ημιαγωγικό υλικό μία εξωτερική διέγερση, όπως είναι μια διαφορά δυναμικού στα άκρα του, αποκρίνεται με την εμφάνιση ρεύματος το οποίο περιγράφεται, όπως και στην περίπτωση ενός αγωγού από τον νόμο του Ohm

$$I = \frac{V}{R} \quad (3)$$

Πειραματικές διατάξεις

Δείγματα: Τα δείγματα αποτελούνται από πλακίδια **ενδογενούς** ημιαγωγού γερμανίου σχήματος ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου είναι τοποθετημένα πάνω σε ειδικές πλακέτες όπως φαίνεται στο σχήμα 2. Οι διαστάσεις των δειγμάτων είναι: $L=20\text{mm}$, $w=10\text{mm}$, και $d=1\text{mm}$. Στα άκρα των ημιαγωγικών πλακιδίων είναι κατασκευασμένες μεταλλικές επαφές από αλουμίνιο για την παροχή του ρεύματος κατά μήκος του δείγματος.

Διάταξη: Η κυκλωματική απεικόνιση του πειράματος προσδιορισμού του ενεργειακού χάσματος φαίνεται στο σχήμα 3(α). Στο σχήμα 3(β) φαίνεται η πειραματική διάταξη για την πλακέτα τύπου 1 και στο σχήμα 3(γ) η πειραματική διάταξη για την πλακέτα τύπου 2.

Τροφοδοσία ρεύματος για την πλακέτα τύπου 1: Το δείγμα στην πλακέτα 1 (σχήμα 2(α)) τροφοδοτείται από μια πηγή σταθερού ρεύματος μέσω μιας αντίστασης $180\ \Omega$ για την προστασία του δείγματος (Η τιμή του ρεύματος στο δείγμα δεν πρέπει να ξεπεράσει τα $30\ \text{mA}$). Σε σειρά είναι συνδεδεμένο και αμπερόμετρο για τον ακριβή προσδιορισμό της έντασης του ρεύματος.

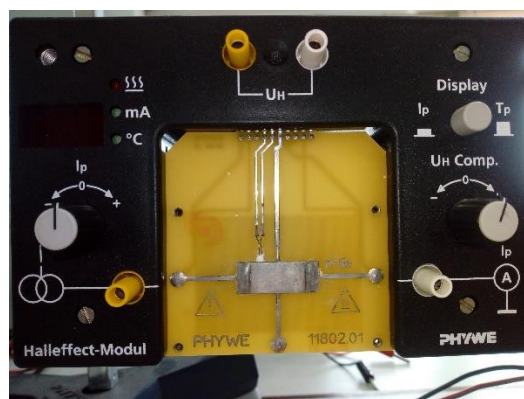
Τροφοδοσία ρεύματος για την πλακέτα τύπου 2: Το δείγμα στην πλακέτα 2 τροφοδοτείται από την ίδια την πλακέτα και η ένταση του ρεύματος ρυθμίζεται από ποτενσιόμετρο επάνω στην πλακέτα. Η πλακέτα συνδέεται με τροφοδοτικό εναλλασσόμενης τάσης ρυθμισμένης στα $12\ \text{V}$ ($12\ \text{V} \sim$)

Ρύθμιση της θερμοκρασίας για την πλακέτα τύπου 1: Η θερμοκρασία ρυθμίζεται μέσω της εφαρμογής σταθερής τάσης που εφαρμόζεται από τροφοδοτικό συνεχούς τάσης.

Ρύθμιση της θερμοκρασίας για την πλακέτα τύπου 2: Η θερμοκρασία ρυθμίζεται από κουμπί που υπάρχει, στο πίσω μέρος, επάνω στην ίδια την πλακέτα.

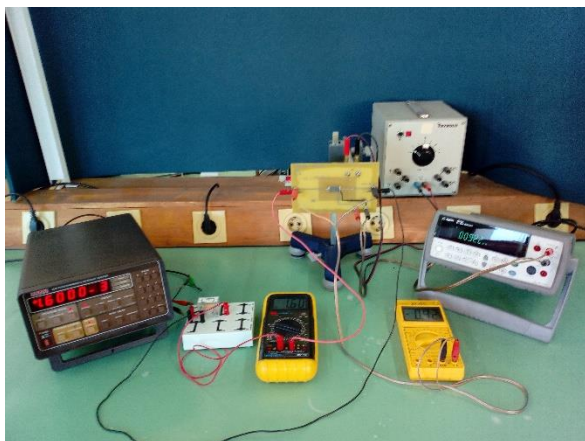
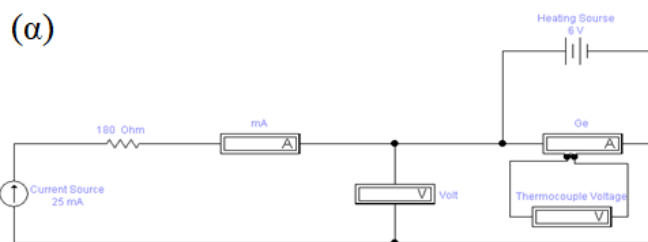


(α)

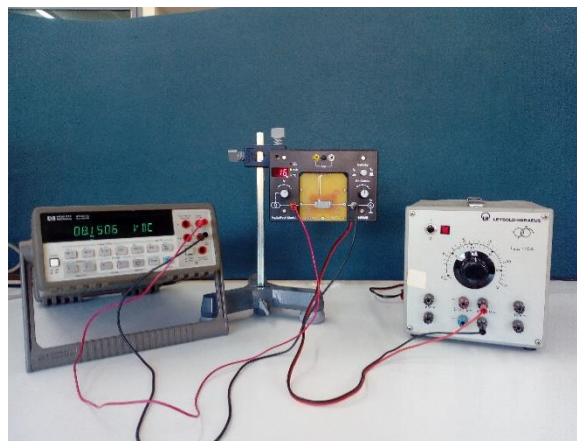


(β)

Σχήμα 2. Πλακέτα γερμανίου (α) τύπου 1 και (β) τύπου 2



(β)



(γ)

Σχήμα 3. (α) Το κυκλωματικό σχέδιο του πειράματος (β) η πειραματική διάταξη για την πλακέτα τύπου 1 και (γ) η πειραματική διάταξη για την πλακέτα τύπου 2.

Διαδικασία πειράματος

Το πείραμα διεξάγεται σε έναν από τους δύο τύπους πλακέτας γερμανίου και περιλαμβάνει τη λήψη μιας σειράς μετρήσεων της τάσης στα άκρα του υλικού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Από τις πειραματικές μετρήσεις θα προσδιοριστεί το ενεργειακό χάσμα που εμφανίζεται στη σχέση (1)

Για την πλακέτα τύπου 1

- Συνδέουμε την γεννήτρια σταθερού ρεύματος (KEITHLEY) με την αντίσταση 180 Ω.
- Συνδέουμε το πολύμετρο (ως αμπερόμετρο) σε σειρά με τη γεννήτρια.
- Συνδέουμε τον έναν ακροδέκτη του ημιαγωγού.
- Ολοκληρώνουμε τη σύνδεση, από τον άλλο ακροδέκτη του ημιαγωγού κλείνοντας το κύκλωμα πίσω στη γεννήτρια σταθερού ρεύματος.
- Συνδέουμε το πολύμετρο (ως βολτόμετρο) παράλληλα με τον ημιαγωγό.
- Συνδέουμε τη γεννήτρια σταθερής τάσης (LEYBOLD) στους ακροδέκτες της πλακέτας που αντιστοιχούν στο θερμαντικό στοιχείο.
- Συνδέουμε το ψηφιακό πολύμετρο (Agilent 34405A) στους ακροδέκτες της πλακέτας για τη μέτρηση της τάσης που σχετίζεται με τη θερμοκρασία.
- Ανάβουμε τα πολύμετρα και τις γεννήτριες
- Στη γεννήτρια σταθερού ρεύματος ρυθμίζουμε την ένταση του ρεύματος στην τιμή 16 mA. **ΠΡΟΣΟΧΗ** την πραγματική τιμή του ρεύματος τη βλέπουμε στο αμπερόμετρο.
- Η τάση στα άκρα του δείγματος θα πρέπει να είναι μεταξύ 8 V και 11 V.

- Ξεκινάμε τη θέρμανση του υλικού θέτοντας τον ροοστάτη της γεννήτριας LEYBOLD στα 2 V.
- Από αυτό το σημείο και μετά η αύξηση της θερμοκρασίας θα είναι συνεχής. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να είμαστε έτοιμοι να σημειώνουμε συνέχεια την τάση στο Agilent και την αντίστοιχη τάση στο πολύμετρο.
- Ξεκινάμε τις μετρήσεις από τάση στο Agilent 0.4 mV μέχρι περίπου 2.8 mV ανά 0.2 mV. **ΠΡΟΣΟΧΗ Η ΤΑΣΗ ΔΕΝ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΞΕΠΕΡΑΣΕΙ ΤΑ 2.9mV.** Προσπαθούμε να πάρουμε τουλάχιστο 10 ζεύγη τιμών
- Η θερμοκρασία ανεβαίνει σχετικά γρήγορα, έτσι θα πρέπει να προαποφασίσουμε τις τιμές τάσης τις οποίες θα μετρήσουμε στο Agilent και για αυτές τις τιμές να σημειώνουμε την τάση στα άκρα του υλικού.
- Μόλις συγκεντρώσουμε 10 με 15 μετρήσεις κλείνουμε το τροφοδοτικό και αφήνουμε την πλακέτα να κρυώσει. **Κατά την ψύξη παίρνουμε μια δεύτερη σειρά μετρήσεων.**
- Κλείνουμε τις γεννήτριες και τα πολύμετρα.

Για την πλακέτα τύπου 2

- Η πλακέτα τύπου 2 δέχεται στο πίσω μέρος της τροφοδοσία εναλλασσόμενου ρεύματος τάσης 12 V ~.
- Η τροφοδοσία της πλακέτας θα γίνει από τη γεννήτρια LEYBOLD – HERAEUS.
- Για να εξασφαλίσουμε τη σωστή τιμή τάσης συνδέουμε το ζεύγος ακροδεκτών 0 – 25 V ~ της γεννήτριας με το πολύμετρο HEWLETT PACKARD 34401A.
- Ελέγχουμε τον ροοστάτη της γεννήτριας και τον βάζουμε στη θέση μηδέν
- Ανοίγουμε το πολύμετρο και τη γεννήτρια
- Ρυθμίζουμε την ένδειξη του πολυμέτρου με το κουμπί AC V ώστε να μετράει εναλλασσόμενη τάση.
- Στρέφουμε σιγά σιγά τον ροοστάτη της γεννήτριας μέχρι η ένδειξη του πολυμέτρου να γίνει ακριβώς 12 V.
- Μόλις πάρουμε τα 12 V ~ τη συνδέουμε με την πλακέτα για να την τροφοδοτήσουμε.
- Βλέπουμε να ανάβουν οι φωτεινές ενδείξεις της πλακέτας.
- Συνδέουμε το πολύμετρο παράλληλα με το δείγμα μας στους αντίστοιχους ακροδέκτες της πλακέτας.
- Ρυθμίζουμε το πολύμετρο ώστε να μετράει συνεχή τάση από το κουμπί DC V.
- Από το ποτενσιόμετρο της πλακέτας Ιρ **ρυθμίζουμε πολύ αργά** την ένταση του ρεύματος στα 16 mA.
- Η τάση στα άκρα του δείγματος θα πρέπει να είναι μεταξύ 8 V και 11 V.
- **Προσέχουμε στην πλακέτα να είναι αναμμένο το λαμπάκι δίπλα στην ένδειξη mA.**
- Πατάμε τον διακόπτη Display Ιρ, Tr και γυρνάμε την ένδειξη σε °C.
- Στο πίσω μέρος της πλακέτας υπάρχει κουμπί που ενεργοποιεί τη θέρμανση. **ΠΡΟΣΟΧΗ οι μετρήσεις που θα πάρουμε δε θα πρέπει να ξεπεράσουν τους 90°C.**
- Το πατάμε και ξεκινάμε να παίρνουμε μετρήσεις. Θα πάρουμε περίπου 10 μετρήσεις ανά 5°C με 10°C.

- Η θερμοκρασία ανεβαίνει πολύ γρήγορα, για το λόγο αυτό θα πρέπει να προαποφασίσουμε σε ποιες θερμοκρασίες θα σημειώσουμε την τάση. Συνίσταται στις ομάδες που υπάρχουν δύο άτομα το ένα να κοιτάει τη θερμοκρασία και το δεύτερο να παρακολουθεί την τάση.
- Μόλις φτάσει η θερμοκρασία τους 90°C σβήνουμε τη θέρμανση. **Κατά την ψύξη παίρνουμε μια δεύτερη σειρά από μετρήσεις.**
- Γυρνάμε την ένδειξη στα mA και μηδενίζουμε σιγά σιγά, μέσω του ροοστάτη, το ρεύμα που διαρρέει το δείγμα
- Κλείνουμε τα πολύμετρα.

Ανάλυση αποτελεσμάτων

Για όλες τις εργασίες θα πρέπει στην αρχή της εργασίας **οπωσδήποτε** να περιλαμβάνονται τα στοιχεία:

AM	Επώνυμο	Όνομα	Εξάμηνο
----	---------	-------	---------

Η εργασία να ανέβει στο εργασίες του eclass **αποκλειστικά και μόνο σε μορφή Excel**

Για την πλακέτα τύπου 1

Τα πειραματικά δεδομένα που συλλέγουμε είναι η τάση στα άκρα του δείγματος U και η τάση που σχετίζεται με τη θερμοκρασία του δείγματος U_{TH} . Για να συσχετίσουμε την τάση U_{TH} που μετράμε με τη θερμοκρασία χρησιμοποιούμε τη σχέση

$$T = \frac{U_{TH}}{\alpha} + T_0 \quad (4)$$

Όπου η τάση U_{TH} έχει μονάδες μV , ο συντελεστής α ισούται με $40 \mu V/K$ και T_0 είναι η θερμοκρασία του χώρου περίπου $298 K$ ($25^\circ C$).

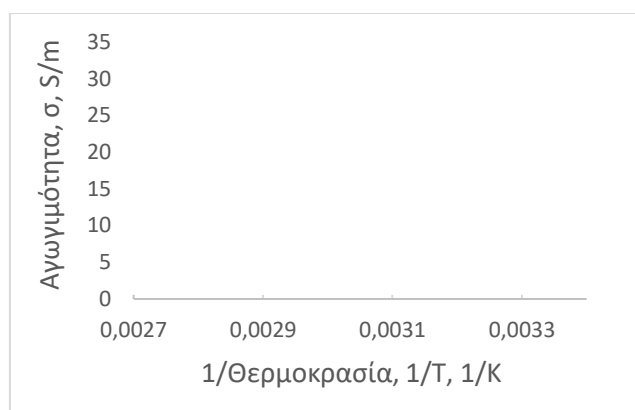
Στην εργασία που θα παραδώσετε:

1. Κατασκευάζετε τους πίνακες με τα δεδομένα ένας για θέρμανση και ένας για την ψύξη με **όλες** τις πειραματικές μετρήσεις.

U_{TH} , (μV)	Θερμοκρασία δείγματος T (K)	$1/T\alpha$ (1/K)	Τάση δείγματος, U (V)	Αντίσταση, R (Ω)	Αγωγιμότητα, σ (S/m)

Η αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση 3 και η αγωγιμότητα από τη σχέση 2

2. Στο ίδιο γράφημα της αγωγιμότητας σε συνάρτηση με το **αντίστροφο** της θερμοκρασίας κατασκευάζετε τις δύο γραφικές παραστάσεις μια για τη θέρμανση και μια για την ψύξη. Χρησιμοποιείτε **όλα** τα σημεία που μετρήθηκαν πειραματικά.



3. Κάνετε την προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης (αναφέρεται ως Fit ή για το Excel trendline) με την εκθετική συνάρτηση (exponential) για τις δύο καμπύλες.
4. Γράφετε την ανάλυσή σας για τον υπολογισμό της παραμέτρου E_g από τις καμπύλες προσαρμογής με βάση τη σχέση 1, για τις δύο σειρές με τα πειραματικά δεδομένα. (Σημείωση: Ο εκθέτης που θα προκύψει από τη θεωρητική προσαρμογή θα είναι ίσος με $-\frac{E_g}{2k}$, από όπου θα προσδιοριστεί και το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού)
5. Υπάρχει διαφορά στις δύο τιμές του E_g που υπολογίσατε και αν ναι που οφείλεται; Περιγράψτε και εξηγήστε αναλυτικά με λόγια. Δε σημειώνουμε μόνο τους αριθμητικούς υπολογισμούς που κάνουμε.

Για την πλακέτα τύπου 2

Τα πειραματικά δεδομένα που συλλέγουμε είναι η τάση στα άκρα του δείγματος U και η θερμοκρασία του δείγματος

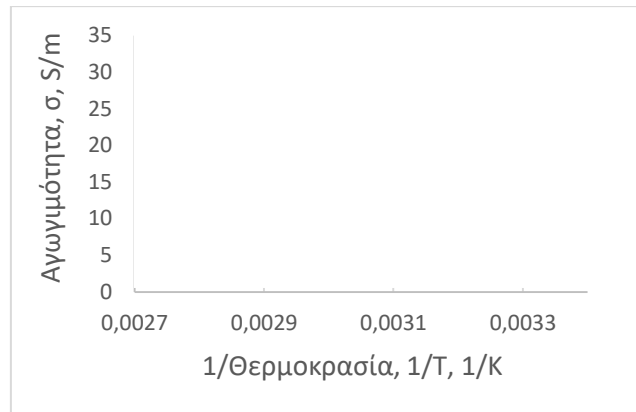
Στην εργασία που θα παραδώσετε:

1. Κατασκευάζετε τους πίνακες με τα δεδομένα ένας για θέρμανση και ένας για την ψύξη με **όλες** τις πειραματικές μετρήσεις.

Θερμοκρασία δείγματος, T (K)	$1/T$, (1/K)	Τάση δείγματος, U , (V)	Αντίσταση, R , (Ω)	Αγωγιμότητα, σ , (S/m)

Η αντίσταση υπολογίζεται από τη σχέση 3 και η αγωγιμότητα από τη σχέση 2

2. Στο ίδιο γράφημα της αγωγιμότητας σε συνάρτηση με το **αντίστροφο** της θερμοκρασίας κατασκευάζετε τις δύο γραφικές παραστάσεις μια για τη θέρμανση και μια για την ψύξη. Χρησιμοποιείτε **όλα** τα σημεία που μετρήθηκαν πειραματικά.



3. Κάνετε την προσαρμογή της θεωρητικής καμπύλης (αναφέρεται ως Fit ή για το Excel trendline) με την εκθετική συνάρτηση (exponential) για τις δύο καμπύλες.
4. Γράφετε την ανάλυσή σας για τον υπολογισμό της παραμέτρου E_g από τις καμπύλες προσαρμογής με βάση τη σχέση 1, για τις δύο σειρές με τα πειραματικά δεδομένα. (Σημείωση: Ο εκθέτης που θα προκύψει από τη θεωρητική προσαρμογή θα είναι ίσος με $-\frac{E_g}{2k}$, από όπου θα προσδιοριστεί και το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού)
5. Υπάρχει διαφορά στις δύο τιμές του E_g που υπολογίσατε και αν ναι που οφείλεται; Περιγράψτε και εξηγήστε αναλυτικά με λόγια. Δε σημειώνουμε μόνο τους αριθμητικούς υπολογισμούς που κάνουμε.

Τιμές αναφοράς (βιβλιογραφίας):

$$E_{g,Ge} = 0,66 \text{ eV}$$