

# Πείραμα 2 -Το ενεργειακό χάσμα του Γερμανίου(Ge).

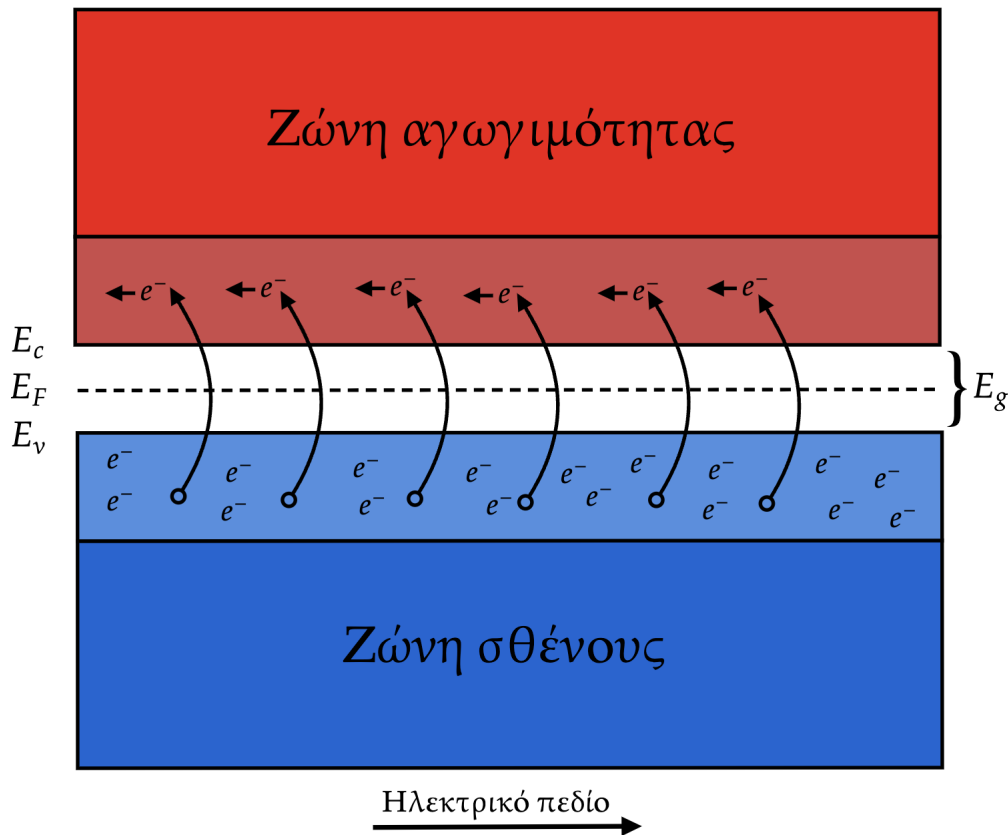
Ιάσων Καζάζης

Προς την κυρία Τσέτσερη.



HELLENIC REPUBLIC  
National and Kapodistrian  
University of Athens  
—EST. 1837—

Προσωπικά στοιχεία | AM: 1110201900073 , email: sph1900073@uoa.gr  
Εκτέλεση άσκησης Παρασκευή 14:00-17:00, 24 Μαΐου 2024.



# Εργαστήριο Εισαγωγής Κατεύθυνσης Φυσικής Στερεάς Κατάστασης.

Πείραμα 2.

24 Ιουνίου 2024

## Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Θεωρία Πειράματος.</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Πειραματική Διαδικασία.</b>	<b>2</b>
2.1	Οργανολογία και διάταξη. . . . .	2
<b>3</b>	<b>Πειραματικά αποτελέσματα.</b>	<b>5</b>
3.1	Δεδομένα πειράματος σε πίνακες. . . . .	5
<b>4</b>	<b>Ανάλυση πειράματος</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Σχόλια-Συμπεράσματα</b>	<b>8</b>
<b>6</b>	<b>Ερωτήματα</b>	<b>9</b>
<b>7</b>	<b>Βιβλιογραφία.</b>	<b>11</b>
7.1	Βιβλιογραφία. . . . .	11
7.2	Αναφορές. . . . .	11
7.3	Μετρήσεις-Δεδομένα. . . . .	11



### Περίληψη

Σκοπός της συγκεκριμένης άσκησης είναι ο υπολογισμός του ενεργειακού χάσματος ενός δείγματος Γερμανίου (Ge). Αυτό μπορούμε να το κάνουμε έμμεσα: υπολογίζοντας της αγωγιμότητα του συναρτήσει της θερμοκρασίας του και στην συνέχεια χαράσσοντας την καμπύλη η κλίση της οποίας δίνει την τιμή  $E_G$  του ενεργειακού χάσματος. Η αγωγιμότητα για κάθε τιμή της θερμοκρασίας υπολογίζεται απλώς και μόνο μέσω του ρεύματος που εφαρμόζουμε καθόλη και της μετρούμενης τάσης στα άκρα του.

## 1 Θεωρία Πειράματος.

Όπως γνωρίζουμε όταν τα ηλεκτρόνια είναι δεσμευμένα σε πυρήνες μπορούν να βρεθούν σε διακριτές ενεργειακές καταστάσεις. Ωστόσο, όταν τα άτομα πλησιάσουν για να σχηματίσουν ένα κρυσταλλικό στερεό, τα ηλεκτρόνια σθένους καθένα από αυτά υπόκεινται σε ένα διαφορετικό δυναμικό δημιουργούμενο από όλους τους πυρήνες και τα γύρω ηλεκτρόνια συνδυαστικά, σχηματίζοντας έτσι ένα πλήθος κοινών ενεργειακών σταθμών που απέχουν ελάχιστα η μία από την άλλη δημιουργώντας την εντύπωση ενιαίων ζωνών, των λεγόμενων ενεργειακών ζωνών.

Φυσικά αυτές έχουν κάποιο μέγιστο εύρος και όπως ακριβώς συμβαίνει με τα ηλεκτρόνια ατόμων που δεν αποτελούν μέρος στερεών, έτσι και εδώ υπάρχουν απαγορευμένες ενεργειακές περιοχές που ονομάζονται ενεργειακά χάσματα ( $E_g$ ).

Η ιδιότητα ενός στερεού να άγει ηλεκτρικό ρεύμα καθορίζεται από την απόκριση των εξωτερικών ηλεκτρονίων των ατόμων του στην εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Ειδικότερα, τα ηλεκτρόνια αυτά χαρακτηρίζονται ως ηλεκτρόνια σθένους και σε έναν κρύσταλλο σχηματίζουν αντίστοιχα την ζώνη σθένους. Όταν αυτή είναι πλήρως κατειλημμένη τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να μεταβούν σε κάποια ανώτερη ενεργειακή κατάσταση ακόμα και όταν το εξωτερικό εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο τους παρέχει την κατάλληλη ενέργεια. Επίσης, λόγω του ενεργειακού χάσματος ( $E_g$ ) δεν μπορούν να μεταβούν ούτε στην επόμενη ενεργειακή ζώνη που ονομάζεται ζώνη αγωγιμότητας και η οποία καθορίζει, όπως είναι αναμενόμενο, κατά πόσο ένα στερεό είναι αγωγίμο. Μάλιστα η διάκριση μεταξύ μονωτών και ημιαγωγών γίνεται βασιζόμενη στο εύρος αυτής της ζώνης μιας και για το πρώτο είδος υλικών το εύρος είναι αρκετά μεγάλο ενώ για το δεύτερο είδος σχετικά μι-

κρό. Τώρα στην ειδική περίπτωση όπου οι δύο ζώνες σχεδόν αλληλοκαλύπτονται και έτσι στην περίπτωση που τα ηλεκτρόνια λάβουν αρκετή ενέργεια μπορούν να μεταβούν σχετικά εύκολα στην ζώνη αγωγιμότητας το υλικό χαρακτηρίζεται ως μέταλλο.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα ηλεκτρόνια των μετάλλων μπορούν να μεταβαίνουν ελεύθερα σε ενεργειακές καταστάσεις της μερικά κατειλημμένης ζώνης σθένους και ζώνης αγωγιμότητας. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέγεθος που καθορίζει αλλά και μετράει πόσο αγωγίμο είναι ένα υλικό ονομάζεται ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma$  και δίνεται από την έκφραση:”

$$\sigma = \frac{ne^2\tau_f}{m^*} \quad (1)$$

“όπου  $n$  η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων,  $\tau_f$  ο χρόνος αποκατάστασης και επιστροφής των ηλεκτρονίων στην επιφάνεια Fermi και  $m^*$  η ενεργός μάζα των ιόντων που αποτελούν το κρυσταλλικό πλέγμα. Φυσικά γνωρίζουμε ότι τα μέταλλα παρουσιάζουν κάποια αντίσταση η οποία οφείλεται τόσο σε πλεγματικές ατέλειες όσο και σε πλεγματικές ταλαντώσεις. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι αύξηση της θερμοκρασίας των μετάλλων οδηγεί σε εντονότερες ταλαντώσεις των ατόμων του κρυσταλλικού πλέγματος και άρα μεγαλύτερη ‘δυσκολία’ των ηλεκτρονίων να μεταβαίνουν ελεύθερα μεταξύ των ενεργειακών καταστάσεων, επομένως αυτό έχει ως αποτέλεσμα μείωση της ειδικής αγωγιμότητας του υλικού και αύξηση της ειδικής αντίστασης του (η ειδική αντίστασης ορίζεται ως το αντίστροφο της αγωγιμότητας  $\rho = \frac{1}{\sigma}$ ).

Εδώ το ενεργειακό χάσμα μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας είναι περίπου  $E_G = 1, \text{eV}$  ενώ η αντίστοιχη τιμή για τους μονωτές είναι  $E_G = 4 - 5, \text{eV}$ . Επίσης η εξάρτηση της αγωγιμότητας σε σχέση με την θερμοκρα-



σία διαφέρει σημαντικά από αυτή των μετάλλων. Συγκεκριμένα η ζώνη σθένους των ημιαγωγών είναι πλήρως κατειλημμένη και η ζώνη αγωγιμότητας κενή σε θερμοκρασία  $T = 0 \text{ K}$ . Με την αύξηση της θερμοκρασίας τα ηλεκτρόνια αποκτούν αρκετή θερμική ενέργεια ώστε να υπερπηδήσουν το ενεργειακό χάσμα και να μεταβούν σε ενεργειακές καταστάσεις της ζώνης αγωγιμότητας αφήνοντας στην ζώνη σθένους τις λεγόμενες οπές που δρουν ως θετικά φορτία. Αυτά σε συνδυασμό με τα ηλεκτρόνια της ζώνης αγωγιμότητας καθιστούν το υλικό αγώγιμο. Μάλιστα η αγωγιμότητα στους ημιαγωγούς προκύπτει ως το άθροισμα των συνεισφορών ηλεκτρίων και οπών:

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_h = \frac{ne^2\tau_e}{m_e^*} + \frac{pe^2\tau_h}{m_h^*} \quad (2)$$

Όπου  $n$  και  $p$  είναι οι συγκεντρώσεις αρνητικών και θετικών φορτίων,  $\tau_e$  και  $\tau_h$  οι χρόνοι αποκατάστασης και  $m_e^*$  και  $m_h^*$  οι ενεργές μάζες των ηλεκτρονίων και των οπών, αντίστοιχα. Για έναν καθαρό ημιαγωγό χωρίς προσμίξεις οι συγκεντρώσεις των οπών και των ηλεκτρονίων είναι:

$$n = p = 2 \left( \frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} e^{-E_G/2k_B T} \quad (3)$$

Αντικαθιστώντας την (3) στην (2) έχουμε:

$$\sigma = 2e^2 \left( \frac{\tau_e}{m_e^*} + \frac{\tau_h}{m_h^*} \right) \left( \frac{k_B T}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} e^{-E_G/2k_B T}$$

Αυτή είναι η έκφραση που δίνει την τιμή της αγωγιμότητας σε συνάρτηση της θερμοκρασίας. Εξαιτίας του γεγονότος ότι οι χρόνοι αποκατάστασης είναι ανάλογοι του  $T^{-3/2}$ , για υλικά χωρίς προσμίξεις, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι πρώτοι τέσσερις παράγοντες του παραπάνω γινομένου είναι μια σταθερά  $\sigma_0$  η οποία δεν εξαρτάται από την θερμοκρασία και η ρεαλιστική εξάρτηση της αγωγιμότητας από αυτήν είναι:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_G/2k_B T} \Rightarrow \ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_G}{2k_B T} \quad (4)$$

Η τελευταία εξίσωση υποδεικνύει ότι ένα διάγραμμα  $\ln \sigma = f(1/T)$  είναι μια ευθεία γραμμή της οποίας η κλίση μπορεί να δώσει το ζητούμενο χάσμα αγωγιμότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω σχέση δίνουν την τιμή της αγωγιμότητας μέσω μικροσκοπικών μεγεθών, πρακτικά η αγωγιμότητα ενός υλικού χρησιμοποιώντας μακροσκοπικά μεγέθη όπως το ρεύμα ( $I$ ) που διαρρέει, η τάση στα άκρα του ( $V$ ) και οι διαστάσεις του ( $L$ ) και ( $A$ ) δίνεται από:

$$\sigma = \frac{IL}{VA} \quad (5)$$

## 2 Πειραματική Διαδικασία.

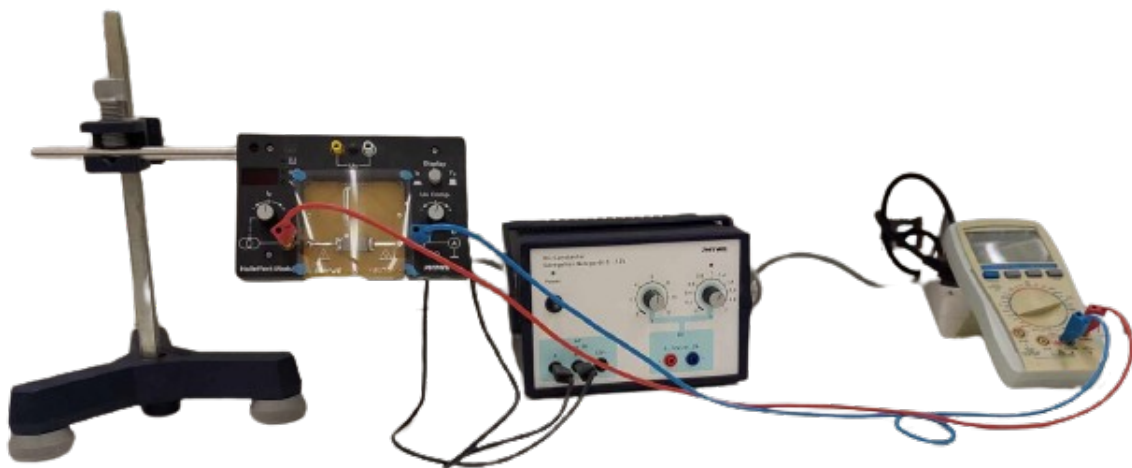
### 2.1 Οργανολογία και διάταξη.

Για το συγκεκριμένο πείραμα η διάταξη, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα, αποτελείται από: ένα τροφοδοτικό (1) συνεχούς τάσης  $0 - 12V$  που τροφοδοτεί το βασικό κύκλωμα αλλά και το δευτερεύον που χρησιμοποιείται για την θέρμανση του κρυστάλλου, μια μονάδα μέτρησης τάσης-ρεύματος (2) που διαρρέει τον κρύσταλλο Γερμανίου συναρτήσει της θερμοκρασίας τους, να σημειωθεί εδώ ότι ο συγκεκριμένος κρύσταλλος έχει τυποποιημένες διαστάσεις  $20 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$  και τέλος ένα ψηφιακό πολύμετρο (3) συνδεδεμένο παράλληλα με τον αντιστάτη του Γερμανίου (Ge).

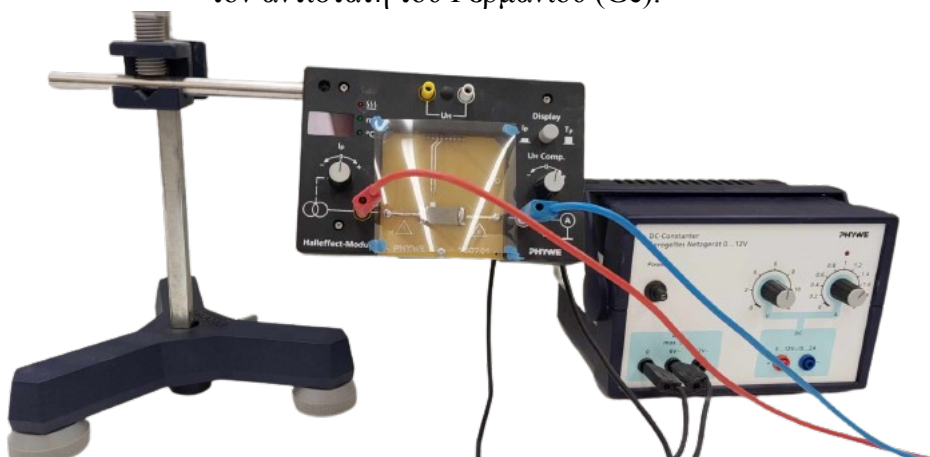
Ξεκινάμε της διαδικασία ρυθμίζουμε το ρεύμα που διαρρέει τον αντιστάτη του Γερμανίου (Ge) στην τιμή  $I = 1\text{mA}$ , στη συνέχεια ενεργοποιούμε την λειτουργία θέρμανσης και περιμένουμε να φτάσει τους  $30^\circ\text{C}$ , τότε ξεκινάμε να σημειώνουμε την τιμή της τάσης  $V_{up}$  που αναγράφεται στο βολτόμετρο συναρτήσει της θερμοκρασίας με βήμα  $5^\circ\text{C}$ . Προκειμένου να μην καταστρέψουμε τον αντιστάτη προσέχουμε ώστε κατά την διαδικασία η θερμοκρασία να μην ξεπεράσει τους  $95^\circ\text{C}$ . Μόλις φτάσουμε σε αυτή την τιμή απενερ-



γοποιούμε την λειτουργία θέρμανσης και επαναλαμβάνουμε την διαδικασία καθώς η θερμοκρασία πέφτει σημειώνοντας την αντίστοιχη τάση  $V_d$ . Να σημειωθεί πως για την κάθε τιμή της τάσης θεωρούμε σφάλμα  $\Delta V = 0.0005\text{V}$  εφόσον η καλύτερη ακρίβεια που μπορούμε να λάβουμε είναι της τάξης του  $0.001\text{V}$ . Στην συνέχεια μετατρέπουμε την θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin μέσω της σχέσης  $T = \Theta + 273.15$  και εξάγουμε το μέσο όρο  $V_{avg}$  των τάσεων  $V_{up}$  και  $V_d$  για κάθε τιμή της θερμοκρασίας  $T$ . Έπειτα υπολογίζουμε την τιμή της αγωγιμότητας σύμφωνα με την σχέση (5).



Εικόνα 1. Η διάταξη με το τροφοδοτικό συνεχούς τάσης, μια μονάδα μέτρησης τάσης-ρεύματος συναρτήσει της θερμοκρασίας τους, ο κρύσταλλος και το ψηφιακό πολύμετρο συνδεδεμένο παράλληλα με τον αντιστάτη του Γερμανίου (Ge).



Εικόνα 2. Ο αντιστάτης και το τροφοδοτικό συνεχούς τάσης.

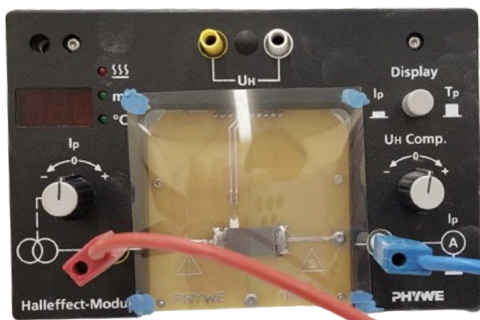
Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει τα εξής στοιχεία:

#### 1. Μονάδα μέτρησης τάσης-ρεύματος (A):

- Μεταγωγό ρύθμισης του ρεύματος (I) που διαρρέει τον κρύσταλλο Ge.
- Ψηφιακή οθόνη που απεικονίζει την τιμή ρεύματος (mA) ή τη θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ ) του δείγματος.
- Λυχνίες LED που δείχνουν την κατάσταση θέρμανσης του δείγματος.



- Διακόπτη επιλογής απεικόνισης ρεύματος (mA) ή θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ ) στην ψηφιακή οθόνη.
  - Υποδοχές εισόδου για τη μέτρηση της τάσης στα άκρα του κρυστάλλου Ge.
  - Υποδοχή πλακέτας Ge.
  - Διακόπτη θέρμανσης (ON-OFF) και υποδοχή τάσης τροφοδοσίας (12 V).
2. **Τροφοδοτικό συνεχούς τάσης (B):** Τροφοδοτεί το κύριο κύκλωμα με τάση 0-12V και περιλαμβάνει κοινή μονάδα με τροφοδοτικό εναλλασσόμενης τάσης για τη θέρμανση του δείγματος.
3. **Ψηφιακό πολύμετρο (Γ):** Συνδέεται παράλληλα με την αντίσταση του Ge για τη μέτρηση της τάσης.



Εικόνα 3. Ο αντιστάτης του Γερκανίου Ge.

Η άσκηση περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. **Εφαρμόζουμε τάση:** Συνδέουμε το τροφοδοτικό (B) και εφαρμόζουμε τάση 6V.
2. **Ρύθμιση ρεύματος:**
  - Επιλέγουμε την απεικόνιση του ρεύματος στην ψηφιακή οθόνη (2) μέσω του διακόπτη (4).
  - Ρυθμίζουμε το ρεύμα που διαρρέει τον αντιστάτη Ge στα 5 mA χρησιμοποιώντας τον μεταγωγό (1) και παρακολουθούμε την ένδειξη στην ψηφιακή οθόνη (2).
  - Διατηρούμε τη ρύθμιση του ρεύματος στα 5 mA σταθερή μέχρι την ολοκλήρωση των μετρήσεων.
3. **Θέρμανση δείγματος:**
  - Ενεργοποιούμε τη λειτουργία θέρμανσης του δείγματος με τον διακόπτη (8) στη θέση ON. Οι LED λυχνίες θα δείξουν την κατάσταση θέρμανσης.
  - Επιλέγουμε την απεικόνιση της θερμοκρασίας στην ψηφιακή οθόνη (2) μέσω του διακόπτη (4).
  - Καταγράφουμε τις τιμές της τάσης (V, σε mV) από το πολύμετρο (Γ) σε κάθε θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ ) με βήμα  $5^{\circ}\text{C}$ , μέχρι την άνοδο της θερμοκρασίας στους  $100^{\circ}\text{C}$ .

**Προσοχούμε τη θέρμανση:** Η θέρμανση γίνεται αρχικά γρήγορα. Κατά την ψύξη του δείγματος στη θερμοκρασία περιβάλλοντος, καταγράφουμε τις μετρήσεις τάσης (V) για τιμές θερμοκρασίας με βήμα  $5^{\circ}\text{C}$ .



### 3 Πειραματικά αποτελέσματα.

#### 3.1 Δεδομένα πειράματος σε πίνακες.

Τα πειραματικά αποτελέσματα είναι τα παρακάτω.

Πειραματικά Δεδομένα Διάταξης.						
$I(A)$	$I = 5mA$		$I = 3mA$		$I = 1mA$	
$T(K)$	$V_{up}(V)$	$V_{down}(V)$	$V_{up}(V)$	$V_{down}(V)$	$V_{up}(V)$	$V_{down}(V)$
303	2,42	2,22	1,95	1,33	0,34	0,31
308	2,02	1,83	1,24	1,10	0,28	0,26
313	1,72	1,55	1,03	0,92	0,24	0,22
318	1,46	1,26	0,86	0,76	0,20	0,18
323	1,21	1,05	0,69	0,63	0,16	0,15
328	0,98	0,86	0,58	0,51	0,13	0,12
333	0,79	0,73	0,47	0,43	0,11	0,10
338	0,66	0,60	0,39	0,36	0,09	0,08
343	0,54	0,51	0,32	0,30	0,07	0,06
348	0,46	0,41	0,27	0,25	0,06	0,05
353	0,38	0,35	0,22	0,21	0,05	0,04
358	0,32	0,29	0,19	0,17	0,04	0,04
363	0,27	0,25	0,16	0,15	0,03	0,03
368	0,23	0,22	0,13	0,12	0,03	0,02
373	0,19	0,19	0,11	0,11	0,02	0,02

Πίνακας 1: Τα πειραματικά δεδομένα όλων των πειραμάτων.

Υπολογισμός Αγωγιμότητας για $I = 5(mA)$			
$T(K)$	$V_{avg}(V)$	$\sigma(\Omega^{-1}mm^{-1})$	$d\sigma(\Omega^{-1}mm^{-1})$
303	2,32	0,00086	0,0000002
308	1,925	0,00104	0,0000003
313	1,635	0,00122	0,0000004
318	1,36	0,00147	0,0000005
323	1,13	0,00177	0,0000008
328	0,92	0,00217	0,0000012
333	0,76	0,00263	0,0000017
338	0,63	0,00317	0,0000025
343	0,525	0,00381	0,0000036
348	0,435	0,00460	0,0000053
353	0,365	0,00548	0,0000075
358	0,305	0,00656	0,0000107
363	0,26	0,00769	0,0000148
368	0,225	0,00889	0,0000198
373	0,19	0,01053	0,0000277

Πίνακας 2: Πειραματικά δεδομένα για τη πρώτη τιμή του ρεύματος  $I = 5mA$  και η εύρεση της αγωγιμότητας.





Υπολογισμός Αγωγιμότητας για $I = 3(mA)$			
$T(K)$	$V_{avg}(V)$	$\sigma(\Omega^{-1}mm^{-1})$	$d\sigma(\Omega^{-1}mm^{-1})$
303	1,64	0,00122	0,0000004
308	1,17	0,00171	0,0000007
313	0,975	0,00205	0,0000011
318	0,81	0,00247	0,0000015
323	0,66	0,00303	0,0000023
328	0,545	0,00367	0,0000034
333	0,45	0,00444	0,0000049
338	0,375	0,00533	0,0000071
343	0,31	0,00645	0,0000104
348	0,26	0,00769	0,0000148
353	0,215	0,00930	0,0000216
358	0,18	0,01111	0,0000309
363	0,155	0,01290	0,0000416
368	0,125	0,01600	0,0000640
373	0,11	0,01818	0,0000826

Πίνακας 3: Πειραματικά δεδομένα για τη πρώτη τιμή του ρεύματος  $I = 3 mA$  και η εύρεση της αγωγιμότητας.

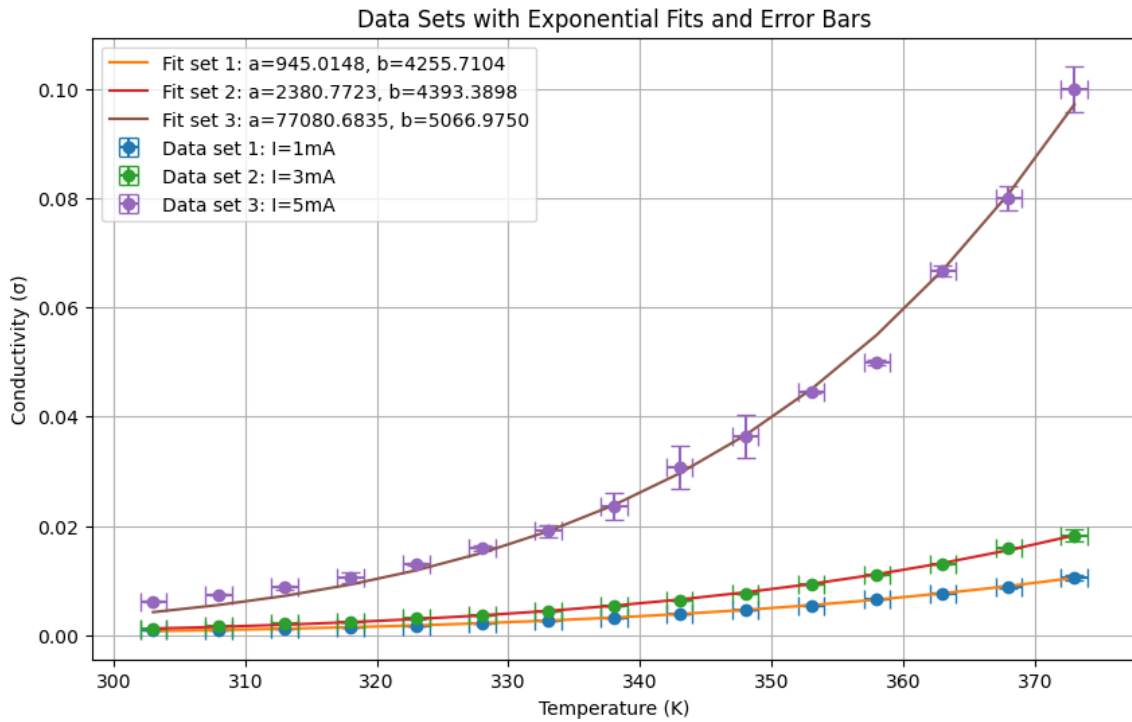
Υπολογισμός Αγωγιμότητας για $I = 1(mA)$			
$T(K)$	$V_{avg}(V)$	$\sigma(\Omega^{-1}mm^{-1})$	$d\sigma(\Omega^{-1}mm^{-1})$
303	0,325	0,00615	0,0000095
308	0,27	0,00741	0,0000137
313	0,23	0,00870	0,0000189
318	0,19	0,01053	0,0000277
323	0,155	0,01290	0,0000416
328	0,125	0,01600	0,0000640
333	0,105	0,01905	0,0000907
338	0,085	0,02353	0,0001384
343	0,065	0,03077	0,0002367
348	0,055	0,03636	0,0003306
353	0,045	0,04444	0,0004938
358	0,04	0,05000	0,0006250
363	0,03	0,06667	0,0011111
368	0,025	0,08000	0,0016000
373	0,02	0,10000	0,0025000

Πίνακας 4: Πειραματικά δεδομένα για τη πρώτη τιμή του ρεύματος  $I = 1 mA$  και η εύρεση της αγωγιμότητας.

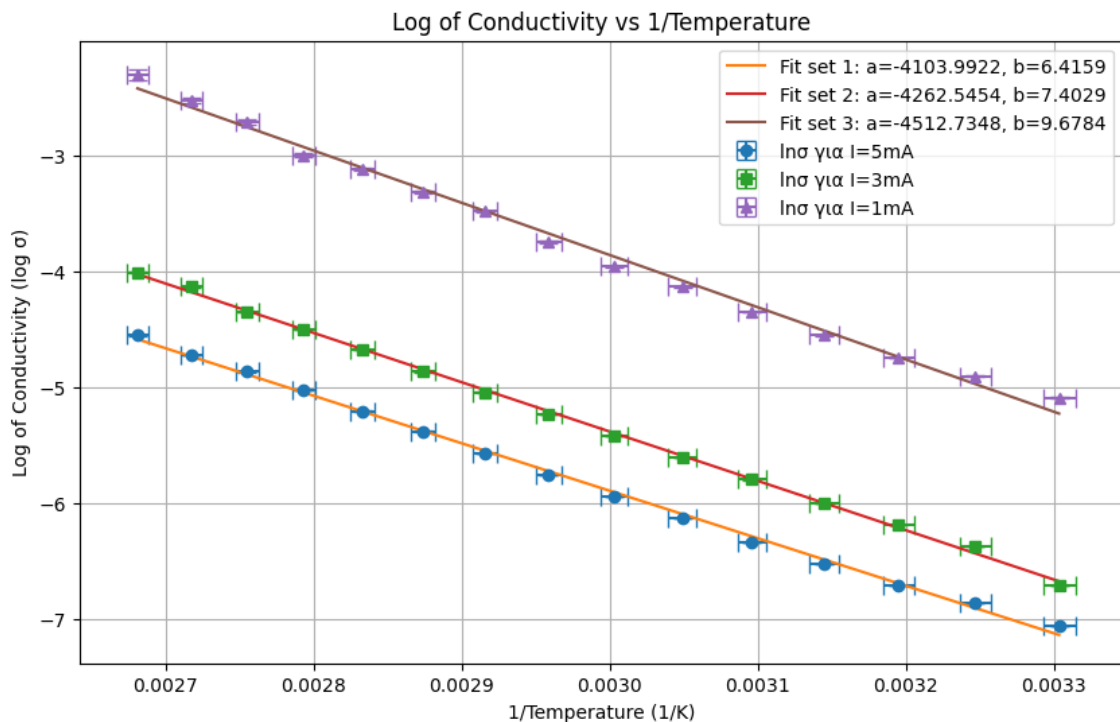
## 4 Ανάλυση πειράματος

Τα γραφήματα που προκύπτουν από τα δεδομένα για την αγωγιμότητα συναρτήσει της θερμοκρασίας, σε κανονική και λογαριθμική κλίμακα είναι τα παρακάτω.





Γράφημα 1: Η αγωγιμότητα σε κανονική κλίμακα συναρτήσει της θερμοκρασίας. Βλέπουμε τις τρεις εκθετικές καμπύλες για τις διαφορετικές τιμές του ρεύματος.



Γράφημα 2: Η αγωγιμότητα σε λογαριθμική κλίμακα συναρτήσει της θερμοκρασίας. Βλέπουμε τις τρεις ευθείες για τις διαφορετικές τιμές του ρεύματος.

Σε αυτό φαίνεται ότι η προσαρμογή μια καμπύλη ίδιας μορφής με αυτή της σχέσης (5) είναι πολύ καλή καθώς το RMSE είναι σχεδόν μηδενικό, επομένως η σχέση (5) επαληθεύεται και πειραματικά. Επίσης όπως ήταν αναμενόμενο παρατηρούμε ότι η αγωγιμότητα του ημιαγωγού Ge αυξάνεται με την αύξηση της



θερμοκρασίας κάτι το οποίο δεν θα ίσχυε για ένα μέταλλο καθώς όπως συζητήθηκε στην θεωρία, αύξηση της έντασης των πλεγματικών ταλαντώσεων εξαιτίας παροχής περισσότερης θερμικής ενέργειας στο σύστημα (η θερμοκρασία αυξάνεται) θα σημαίνει "δυσκολία" της κίνησης των ηλεκτρονίων και άρα μείωση αγωγιμότητας. Έτσι η αντίστοιχη καμπύλη για ένα μέταλλο θα ήταν σίγουρα φθίνουσα χωρίς ωστόσο να μπορούμε να προσδιορίσουμε την μορφή της με τα δεδομένα που παρέχονται. Έπειτα υπολογίζουμε τον λογάριθμο της αγωγιμότητας  $\sigma$  για κάθε τιμή των πινάκων (2-4) καθώς και το αντίστροφο της θερμοκρασίας. Χαράσουμε την καμπύλη  $\ln \sigma = f(1/T)$  με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων και βρίσκουμε την κλίση της.

Χρησιμοποιούμε την εξίσωση (6) και τις κλίσεις των ευθειών του δεύτερου διαγράμματος

Για το πρώτο σετ δεδομένων με  $I = 5 \text{ mA}$ , το ενεργειακό χάσμα προκύπτει ίσο με,

$$E_g = 0.7073 \pm 0.0086 \text{ eV}$$

Για το δεύτερο σετ δεδομένων με  $I = 3 \text{ mA}$ , το ενεργειακό χάσμα προκύπτει ίσο με,

$$E_g = 0.7346 \pm 0.0066 \text{ eV}$$

Για το τρίτο σετ δεδομένων με  $I = 1 \text{ mA}$ , το ενεργειακό χάσμα προκύπτει ίσο με,

$$E_g = 0.7778 \pm 0.0171 \text{ eV}$$

Ο μέσος όρος και το σφάλμα θα είναι

$$E_g = 0.7291 \pm 0.0050 \text{ eV}$$

## 5 Σχόλια-Συμπεράσματα

Συνολικά λοιπόν καταφέραμε να υπολογίσουμε την πειραματική τιμή του ενεργειακού χάσματος του Γερμανίου (Ge). Συγκρίνοντας με την αντίστοιχη τιμή της βιβλιογραφίας η οποία είναι  $E_g = 0.74 \text{ eV}$  στους  $0 \text{ K}$ , συμπεραίνουμε ότι η τιμή που εξάγαμε είναι πολύ κοντά σε αυτήν καθώς η σχετική απόκλιση είναι της τάξης του 1.35%, επομένως πετύχαμε ένα πολύ καλό αποτέλεσμα. Ωστόσο παρά την μικρή απόκλιση δεν μπορούμε παρά να αναγνωρίσουμε μερικά από τα σφάλματα που πιθανώς οδήγησαν σε αυτή:

- Καταρχάς κατά την αύξηση της θερμοκρασίας η τιμή της τάσης αυξάνεται ιδιαίτερα γρήγορα με αποτέλεσμα να υπάρχουν μεγάλα περιθώρια συστηματικών σφάλματος επομένως αναγκαστήκαμε να πάρουμε τις ίδιες μετρήσεις κατά την ψύξη του δείγματος όπου οι τιμές της τάσης μειώνονται λιγότερο απότομα και έτσι λαμβάνοντας στην συνέχεια το μέσο όρο αυτών πετύχαμε κάποια ελαχιστοποίηση του σφάλματος.
- Έπειτα ακόμα ένα συστηματικό σφάλμα αποτελεί η ακριβής μέτρηση της θερμοκρασίας η οποία συχνά μεταβάλλονται πέρα από την καθορισμένη τιμή τέλος εάν θελήσουμε να είμαστε άκρως σχολαστικοί ίσως οφείλουμε να λάβουμε υπόψη και τις αντιστάσεις (αν και πολύ μικρές) των μεταλλικών που χρησιμοποιήθηκαν, οι οποίες στην προκειμένη περίπτωση που επιθυμούμε πολύ ακρίβεια της έντασης του ρεύματος και της τάσης, επηρεάζουν τις μετρήσεις.



## 6 Ερωτήματα

### Ερώτηση 4 του εργαστηριακού οδηγού

Το Band gap δίνεται από:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

Σε θερμοκρασία  $T = 300 \text{ K}$ , η ενέργεια χάσματος  $E_g$  υπολογίζεται ως εξής:

$$E_g = 0.742 - 4.8 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{T^2}{T + 235}$$

Η πιο κοντινή προφανώς στα πειραματικά μας δεδομένα είναι για  $T=0$ . Άρα πρόκειται για την  $T=0$ . Στον εργαστηριακό οδηγό δίνεται ότι  $E_g(0\text{K}) = 0.74\text{eV}$  και  $E_g(300\text{K}) = 0.67\text{eV}$ , η τιμή που εμείς βρήκαμε παραπάνω προσεγγίζει περισσότερο την  $E_g(0\text{K})$  ωστόσο η θερμοκρασία που έχουμε είναι πιο κοντά στους  $300 \text{ K}$  παρά στους  $0\text{K}$ . Ο λόγος είναι ότι, όπως είπαμε στην ενότητα 2.4, ο χρόνος αποκατάστασης μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, επομένως όταν εμείς μετράμε την τάση πιθανώς η ισορροπία δεν έχει επέλθει και άρα δεν μετράμε την μέγιστη δυνατή αγωγιμότητα και άρα το ελάχιστο δυνατό ενεργειακό χάσμα. Άρα για να πετύχουμε την  $E_g(300\text{K}) = 0.67\text{eV}$  θα πρέπει να αφήνουμε τον αγωγό στην εκάστοτε σταθερή θερμοκρασία για κάποιο χρονικό διάστημα και στην συνέχεια να παίρνουμε μια μέτρηση της τάσης στα άκρα του.

**Γιατί η τιμή της τάσης  $V_{up}$  είναι συστηματικά μεγαλύτερη από την  $V_{down}$ ;**

Εφόσον η τάση βρίσκεται στον παρανομαστή της σχέσης (7) συμπεραίνουμε και ότι  $\sigma_{down} > \sigma_{up}$  γεγονός που φαίνεται να δείχνει ότι το Γερμάνιο είναι πιο αγωγίμο όταν η θερμοκρασία του μειώνεται παρά όταν αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ύπαρξης προσμίξεων ή καλύτερα ατελειών στο κρυσταλλικό πλέγμα του Γερμανίου. Εμείς μπορεί προς διευκόλυνση μας να τις αγνοήσαμε ωστόσο είναι σχεδόν απίθανο να μην υπάρχουν στο δείγμα μας, έτσι όταν η θερμοκρασία αυξάνεται τέτοιες ατέλειες ταλαντώνονται εντονότερα γεγονός που καθιστά τη κίνηση των ηλεκτρονίων δυσκολότερη και άρα η αγωγιμότητα μειώνεται ή με άλλα λόγια η ειδική αντίσταση αυξάνεται, αντίθετα όταν η θερμοκρασία μειώνεται οι ταλαντώσεις τέτοιων ανωμαλιών εξασθενούν καθιστώντας το υλικό περισσότερο αγωγίμο σε σχέση με την άλλη περίπτωση μιας και πλέον οι ταλαντώσεις των όποιων ατελειών και γενικότερα του πλέγματος είναι λιγότερο έντονες. Τα παραπάνω μπορούμε να εκφράσουμε και μέσω των χρόνων αποκατάστασης οι οποίοι ορίζουν ότι ένα μεγάλο χρονικό διάστημα πρέπει να παρέλθει με τον ημιαγωγό να βρίσκεται σε μια σταθερή θερμοκρασία ώστε η τάση στα άκρα του να είναι αντιπροσωπευτική.

**Συνισφορά του εμπλουτισμού στην αγωγιμότητα.**

Οι p-type και n-type ημιαγωγοί είναι τύποι ημιαγωγών που χαρακτηρίζονται από τον τύπο των φορέων ηλεκτρικού φορτίου που κυριαρχούν στο υλικό

Οι p-type ημιαγωγοί έχουν ως κύριους φορείς φορτίου τις τρύπες που είναι θετικά φορτισμένες. Τα υλικά αυτά δημιουργούνται με την εισαγωγή προσμίξεων από αποδέκτες δηλαδή άτομα με λιγότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα σε σχέση με τα άτομα του ημιαγωγού. Συνήθως χρησιμοποιούνται στοιχεία της Ομάδας III όπως το βόριο. Όταν ένα άτομο από την Ομάδα III εισαχθεί σε έναν ημιαγωγό όπως το πυρίτιο δημιουργεί μια τρύπα στη θέση του πρόσθετου ατόμου καθώς τα άτομα της Ομάδας III έχουν ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο στην εξωτερική τους στοιβάδα από τα άτομα του πυριτίου. Οι τρύπες λειτουργούν ως κύριοι φορείς φορτίου και όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο οι τρύπες κινούνται προς την κατεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου κάνοντας το υλικό αγωγίμο.



Οι n-type ημιαγωγοί έχουν ως κύριους φορείς φορτίου τα ηλεκτρόνια που είναι αρνητικά φορτισμένα. Τα υλικά αυτά δημιουργούνται με την εισαγωγή προσμείξεων από δότες δηλαδή άτομα με περισσότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα σε σχέση με τα άτομα του ημιαγωγού. Συνήθως χρησιμοποιούνται στοιχεία της Ομάδας V όπως το φώσφορο. Όταν ένα άτομο από την Ομάδα V εισαχθεί σε έναν ημιαγωγό όπως το πυρίτιο προσθέτει ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο στην εξωτερική του στοιβάδα καθώς τα άτομα της Ομάδας V έχουν ένα περισσότερο ηλεκτρόνιο από τα άτομα του πυριτίου. Τα επιπλέον ηλεκτρόνια λειτουργούν ως κύριοι φορείς φορτίου και όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό πεδίο τα ηλεκτρόνια κινούνται προς την κατεύθυνση αντίθετη του ηλεκτρικού πεδίου κάνοντας το υλικό αγώγιμο.

Οι p-type και n-type ημιαγωγοί χρησιμοποιούνται ευρέως σε ηλεκτρονικές συσκευές όπως διόδους και τρανζίστορες για τη δημιουργία περιοχών p-n και την επίτευξη ηλεκτρικών και οπτικών ιδιοτήτων που είναι κρίσιμες για τη λειτουργία τους.

Η σχέση μεταξύ των αποδεκτών και των δοτών κοντά στη ζώνη σθένους αναφέρεται στις ενεργειακές στάθμες που δημιουργούνται από την εισαγωγή των προσμείξεων σε έναν ημιαγωγό όπως το γερμάνιο. Αυτές οι προσμίξεις επηρεάζουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού δημιουργώντας ενεργειακές στάθμες είτε κοντά στη ζώνη σθένους είτε κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας.

Οι αποδέκτες είναι άτομα προσμείξεων από την Ομάδα III όπως το βόριο που έχουν ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο στην εξωτερική τους στοιβάδα σε σχέση με τα άτομα του ημιαγωγού. Όταν αυτά τα άτομα εισάγονται στον ημιαγωγό δημιουργούν ενεργειακές στάθμες λίγο πάνω από τη ζώνη σθένους. Αυτές οι στάθμες μπορούν εύκολα να δεχτούν ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους δημιουργώντας τρύπες. Οι τρύπες λειτουργούν ως κύριοι φορείς φορτίου σε p-type ημιαγωγούς.

Οι δότες είναι άτομα προσμείξεων από την Ομάδα V όπως το φώσφορο που έχουν ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο στην εξωτερική τους στοιβάδα σε σχέση με τα άτομα του ημιαγωγού. Όταν αυτά τα άτομα εισάγονται στον ημιαγωγό δημιουργούν ενεργειακές στάθμες λίγο κάτω από τη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτές οι στάθμες μπορούν εύκολα να δώσουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας δημιουργώντας ελεύθερα ηλεκτρόνια. Οι ελεύθερα ηλεκτρόνια λειτουργούν ως κύριοι φορείς φορτίου σε n-type ημιαγωγούς.

Συνοψίζοντας οι αποδέκτες δημιουργούν ενεργειακές στάθμες κοντά στη ζώνη σθένους ενώ οι δότες δημιουργούν ενεργειακές στάθμες κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτές οι στάθμες επηρεάζουν τις ιδιότητες αγωγιμότητας του ημιαγωγού επιτρέποντας τον έλεγχο του τύπου και της συγκέντρωσης των φορέων φορτίου.

**Επηρεάζει τις μετρήσεις μας το ορατό φως;** Η απάντηση είναι πως όχι και αυτό γιατί προκειμένου να συμβεί κάτι τέτοιο πρέπει τα φωτόνια του ορατού μέρους της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας να προσδώσουν αρκετή ενέργεια στα ατομικά ηλεκτρόνια του Γερμανίου ώστε να υπερπηδήσουν το ενεργειακό χάσμα πριν προλάβουν να το κάνουν λόγω της θερμικής ενέργειας που τους προσδίδουμε, αλλοιώνοντας έτσι τις τιμές της μετρούμενης τάσης. Γνωρίζουμε ότι το ενεργειακό χάσμα είναι περίπου  $E_g = 0.75\text{eV}$ , επίσης αν θεωρήσουμε ότι ένα μέσο μήκος κύματος ενός φωτονίου στο ορατό είναι  $\lambda = 550\text{ nm}$  και άρα συχνότητας  $f = 545\text{ GHz}$ ,  $hf = 2.25\text{eV}$ . Αυτή η ενέργεια είναι κατά πολύ μεγαλύτερη του ενεργειακού χάσματος επομένως είναι δυνατόν τα φωτόνια της ορατής ακτινοβολίας να παρέχουν αρκετή ενέργεια στα ηλεκτρόνια ώστε να πραγματοποιηθεί η παραπάνω διαδικασία και έτσι να μετρήσουμε μεγαλύτερη αγωγιμότητα από την πραγματική.



## 7 Βιβλιογραφία.

### 7.1 Βιβλιογραφία.

- [Bλ1] Εργαστηριακός Οδηγός Κατεύθυνσης Φυσικής Συμπυκνωμένης ύλης 2020.  
[Bλ2] Εισαγωγή στη φυσική στερεάς κατάστασης. Kittel. Έκδοση 5, Πνευματικός.  
[Bλ3] Φυσική στερεάς κατάστασης, Ashcroft, Mermin, Πνευματικός.  
[Bλ4] Φυσική στερεάς κατάστασης, Ibach Harald, Lüch Hans, ZHTH.  
[Bλ5] Φυσική στερεάς κατάστασης, Ε.Ν. Οικονόμου, ΠΕΚ.  
[Bλ6] Φυσική στερεάς κατάστασης, Philip Hofmann, Παπαζήση.  
[Bλ7] Οπτοηλεκτρονική, Jasprit Singh, Τζιόλα.

### 7.2 Αναφορές.

- [1] Οδηγίες για το Πείραμα 1β του νέου εργαστηριακού φυλλαδίου.  
[2] p-n junction, άρθρο Wikipedia.  
[3] W. Shockley, "The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors," in The Bell System Technical Journal, vol. 28, no. 3, pp. 435-489, July 1949.  
[4] M. Riordan and L. Hoddeson, "The origins of the pn junction," in IEEE Spectrum, vol. 34, no. 6, pp. 46-51, June 1997.

### 7.3 Μετρήσεις-Δεδομένα.

- [Data-1]: Πρώτο σετ μετρήσεων set1.txt  
[Data-2]: Δεύτερο σετ μετρήσεων set2.txt

