

Άσκηση 3

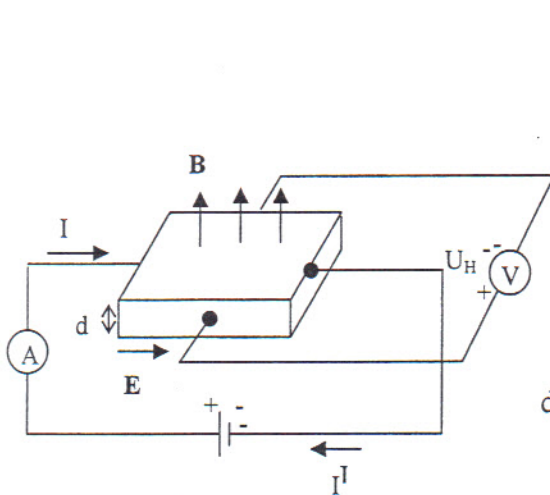
Φαινόμενο Hall σε ημιαγωγό τύπου p (p-Ge)

3.1. Σκοπός

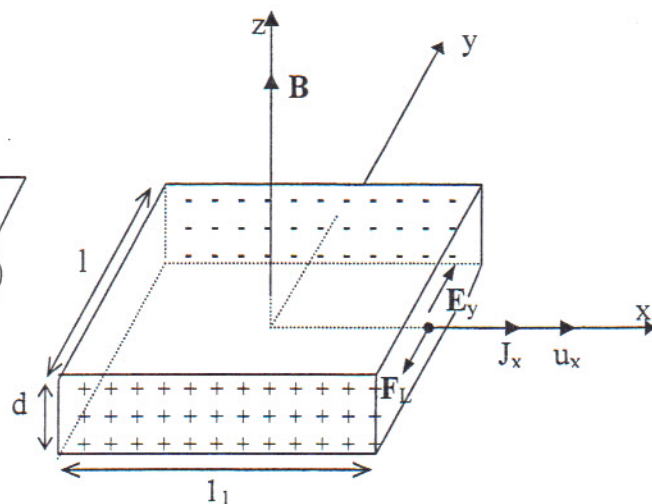
Σκοπός της άσκησης είναι η μέτρηση της τάσης Hall συναρτήσεως του ρεύματος που διαρρέει έναν ημιαγωγό σε σταθερό μαγνητικό πεδίο και της αγωγιμότητας συναρτήσεως της θερμοκρασίας, για τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης και της ευκινησίας των φορέων αγωγιμότητας, και του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού.

3.2. Γενικά

Θεωρούμε αγώγιμο υλικό σε σχήμα ορθογώνιας πλάκας πάχους d , το οποίο διαρρέεται από ρεύμα έντασης I με κατεύθυνση από αριστερά προς τα δεξιά (Σχήμα 3.1), ενώ βρίσκεται μέσα σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο \vec{B} , κάθετο στο επίπεδο της πλάκας και στη διεύθυνση του ρεύματος.



Σχήμα 3.1



Σχήμα 3.2

Τότε μεταξύ της εμπρόσθιας και οπίσθιας πλευράς της πλάκας θα εμφανιστεί μια διαφορά δυναμικού U_H η οποία καλείται τάση Hall. Η πολικότητα της τάσης Hall στην περίπτωση του Σχήματος 3.2, αναφέρεται σε θετικούς φορείς φορτίου.

Η τάση Hall (και το φαινόμενο Hall) εξηγείται από την απόκλιση προς μια κατεύθυνση των κινουμένων με ταχύτητα \vec{v}_x φορέων φορτίου q εντός της πλάκας, η οποία βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο \vec{B} , λόγω της δύναμης Lorentz (Σχήμα 3.2),

$$\vec{F} = q \vec{v}_x \times \vec{B} . \quad (3.1)$$

Η συνισταμένη δύναμη που ασκείται πάνω σε κάθε φορέα φορτίου $q = e$ ισούται με:

$$\vec{F}_{ολ} = e (\vec{E}_y + \vec{v}_x \times \vec{B}) \quad (3.2)$$

όπου $e \vec{E}_y = \vec{F}_E$ η ηλεκτροστατική δύναμη (Coulomb) και $e \vec{v}_x \times \vec{B} = \vec{F}_L$ η μαγνητική δύναμη (Lorentz), οι οποίες είναι αντίθετες. Στη μόνιμη κατάσταση οι δύο δυνάμεις ισορροπούν. Έτσι, κατά τη διεύθυνση y (Σχ. 3.2) ισχύει:

$$\vec{F}_{ολ} = \vec{F}_E + \vec{F}_L = 0$$

δηλαδή
$$e (E_y - v_x B) = 0$$

και
$$E_y = v_x B . \quad (3.3)$$

Η πυκνότητα ρεύματος που διαρρέει την αγώγιμη πλάκα ισούται με

$$J_x = Ne v_x \quad (3.4)$$

όπου N είναι η συγκέντρωση των φορέων φορτίου, v_x η ταχύτητα ολίσθησής τους και e το φορτίο κάθε φορέα φορτίου. Από τις σχέσεις (1.3) και (1.4) προκύπτει η σχέση

$$E_y = \frac{J_x B}{Ne} \quad (3.5)$$

Αλλά η πυκνότητα ρεύματος εξ ορισμού ισούται με

$$J_x = \frac{I}{ld} \quad (3.6)$$

όπου I το ρεύμα, που ομοιόμορφα διαρρέει την πλάκα σε όλο τον όγκο της και ld η διατομή της πλάκας από την οποία διέρχεται το ρεύμα. Έτσι από τις σχέσεις (3.5) και (3.6) έχουμε

$$E_y = \frac{IB}{Neld} \quad (3.7)$$

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της ισότητας (3.7) επί τη διάσταση l (βλ. Σχ. 3.2), λαμβάνουμε τη διαφορά τάσης U_H ανάμεσα στις δύο πλευρές (εμπρός/πίσθια) της πλάκας, η οποία καλείται *τάση Hall*

$$U_H = \frac{1}{Ne} \frac{IB}{d}. \quad (3.8)$$

Το πηλίκο

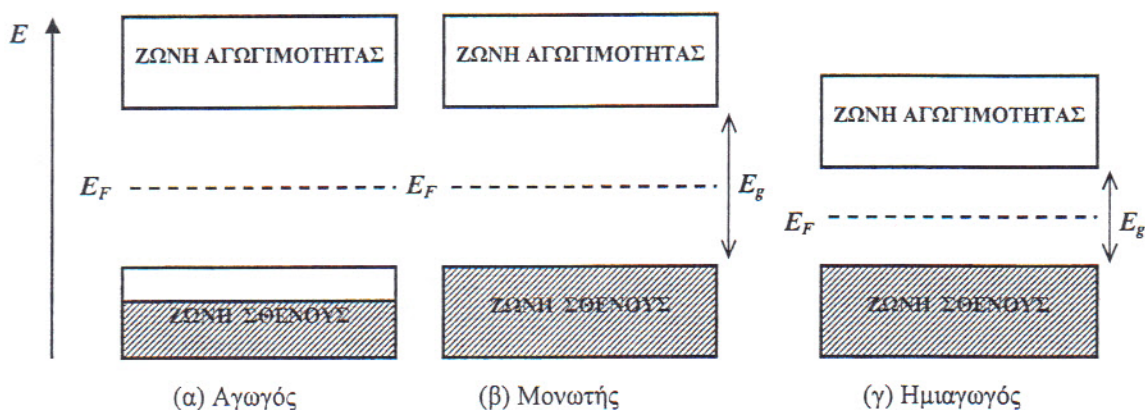
$$R_H = \frac{1}{Ne}$$

ονομάζεται *συντελεστής Hall*. Είναι αρνητικός στην περίπτωση που οι φορείς φορτίου είναι ηλεκτρόνια.

Η τάση Hall U_H , σύμφωνα με την εξίσωση (3.8) είναι ανάλογη του ρεύματος I που διαρρέει την πλάκα, του μαγνητικού πεδίου B και αντιστρόφως ανάλογη της συγκέντρωσης N των φορέων φορτίου.

Το δοκίμιο μπορεί να είναι ένας αγωγός όπως π.χ. τα μέταλλα Ag, Cu, κλπ. ή ένας ημιαγωγός όπως π.χ. το Ge, Si κλπ. Οι ημιαγωγοί είναι ηλεκτρονικοί αγωγοί που εμφανίζουν ηλεκτρική αντίσταση στην περιοχή $10^{-2} - 10^9 \Omega \text{ cm}$, περιοχή ενδιάμεση εκείνης των καλών αγωγών ($10^{-6} \Omega \text{ cm}$) και των μονωτών ($10^{14} - 10^{22} \Omega \text{ cm}$) σε θερμοκρασία δωματίου.

Στη θερμοκρασία $T=0 \text{ K}$ ($-273,16 \text{ }^\circ\text{C}$) ένας καθαρός (από προσμίξεις) και τέλειος (χωρίς ατέλειες ή παραμορφώσεις) κρύσταλλος των περισσοτέρων ημιαγωγών συμπεριφέρεται σαν μονωτής. Οι χαρακτηριστικές ιδιότητες ενός ημιαγωγού εξαρτώνται κυρίως από τη θερμοκρασία, τις προσμίξεις και τις ατέλειες του κρυσταλλικού πλέγματος. Πολλές διατάξεις πρακτικών εφαρμογών βασίζονται στις χαρακτηριστικές ιδιότητες των ημιαγωγών όπως π.χ. οι ανορθωτές, διαμορφωτές, φωρατές, φωτοανιχνευτές, θερμίστορ, τρανζίστορ κλπ. Οι αγωγοί, μονωτές και ημιαγωγοί, χαρακτηρίζονται από τα ενεργειακά διαγράμματα ζωνών τους. (Σχ. 3.3 α, β, γ)



Σχήμα 3.3.

Στον αγωγό, η ζώνη σθένους είναι μερικά συμπληρωμένη από ηλεκτρόνια, τα οποία μπορούν να κινούνται ελεύθερα εφόσον εφαρμόζεται κάποιο εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο (Σχ. 3.3α). Στον μονωτή η ζώνη σθένους είναι πλήρης από

ηλεκτρόνια. Η ζώνη σθένους χωρίζεται από τη ζώνη αγωγιμότητας, η οποία είναι τελείως κενή από ηλεκτρόνια, με την απαγορευμένη ζώνη ή το ενεργειακό χάσμα με εύρος E_g (Σχ. 3.3β). Τέλος, στον ημιαγωγό (Σχ. 3.3γ) η ζώνη σθένους είναι επίσης τελείως πλήρης από ηλεκτρόνια και χωρίζεται από τη ζώνη αγωγιμότητας που είναι τελείως κενή από ηλεκτρόνια, με την απαγορευμένη ζώνη ή το ενεργειακό χάσμα E_g . Το εύρος του ενεργειακού χάσματος των ημιαγωγών όμως είναι μικρότερο εκείνου των μονωτών. Δηλαδή, $E_{g \text{ ημιαγωγός}} < E_{g \text{ μονωτής}}$.

Η διακεκομμένη γραμμή στο μέσον του ενεργειακού χάσματος στον αγωγό - μονωτή - ημιαγωγό συμβολίζει την ενεργειακή στάθμη Fermi, E_F . Οι φορείς αγωγιμότητας σε ένα ημιαγωγό είναι τα ηλεκτρόνια και οι οπές. Οι οπές είναι κενές θέσεις αρνητικού φορτίου, σε κάποιο ομοιοπολικό δεσμό. Μια οπή μπορεί να δημιουργηθεί όταν π.χ. ένα ηλεκτρόνιο απομακρυνθεί από κάποιο ομοιοπολικό δεσμό. Αν η κενή θέση του αρνητικού φορτίου στον ομοιοπολικό δεσμό καταληφθεί από ένα ηλεκτρόνιο γειτονικού ατόμου, τότε η κενή θέση (οπή) μεταφέρεται σ' αυτό (Σχ. 3.4). Έτσι, η οπή συμπεριφέρεται σαν ένα θετικά φορτισμένο σωματίο, παρόλο που το κινούμενο φορτίο είναι το ηλεκτρόνιο.

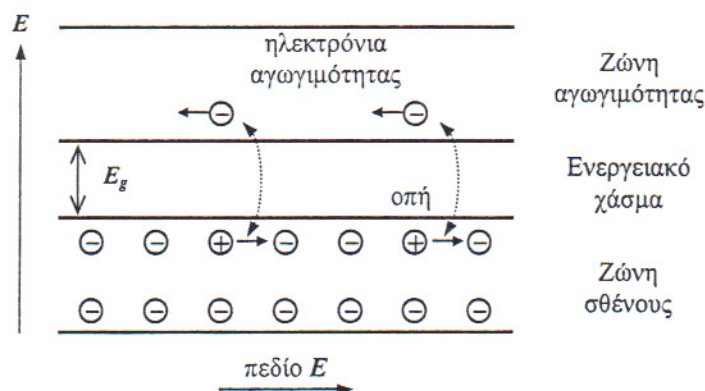
Ένας αμιγής (χωρίς προσμείξεις) ημιαγωγός εμφανίζει στις συνήθεις θερμοκρασίες, κάποια αγωγιμότητα η οποία καλείται ενδογενής αγωγιμότητα (intrinsic conductivity). Σε ένα τέτοιο ημιαγωγό για συνήθεις θερμοκρασίες, οι οπές και τα ηλεκτρόνια συνυπάρχουν σε ίσους αριθμούς και η αγωγιμότητά του δίνεται από τη σχέση

$$\sigma = |e|(n_e \mu_e + n_h \mu_h) \quad (3.9)$$

όπου n_e , n_h είναι οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και οπών και μ_e , μ_h οι ευκινησίες (mobilities) των ηλεκτρονίων και των οπών αντίστοιχα. Η ευκινησία ενός φορέα φορτίου ορίζεται ως:

$$\mu = \text{ταχύτητα ολίσθησης φορέων φορτίου} / \text{ηλεκτρικό πεδίο} = \frac{v}{E}.$$

Καθώς η θερμοκρασία του ημιαγωγού αυξάνει, τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους διεγείρονται θερμικά και μεταπηδούν στη ζώνη αγωγιμότητας με ταυτόχρονη δημιουργία οπών σε αυτή. Όταν σε ένα τέτοιο αμιγή ημιαγωγό εφαρμοστεί κάποιο ηλεκτρικό πεδίο τα ηλεκτρόνια και οι οπές κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις (Σχ. 3.4).



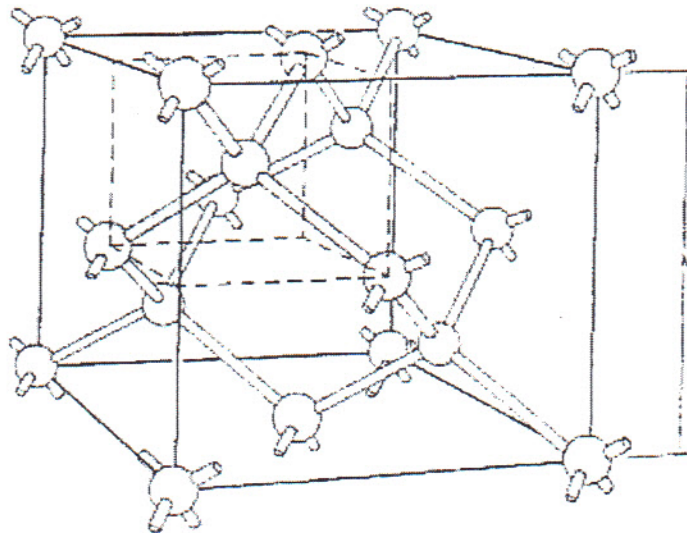
Σχήμα 3.4

Η εξάρτηση της ενδογενούς αγωγιμότητας ενός ημιαγωγού από τη θερμοκρασία, δίνεται από τη σχέση

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g / 2kT} \quad (3.10)$$

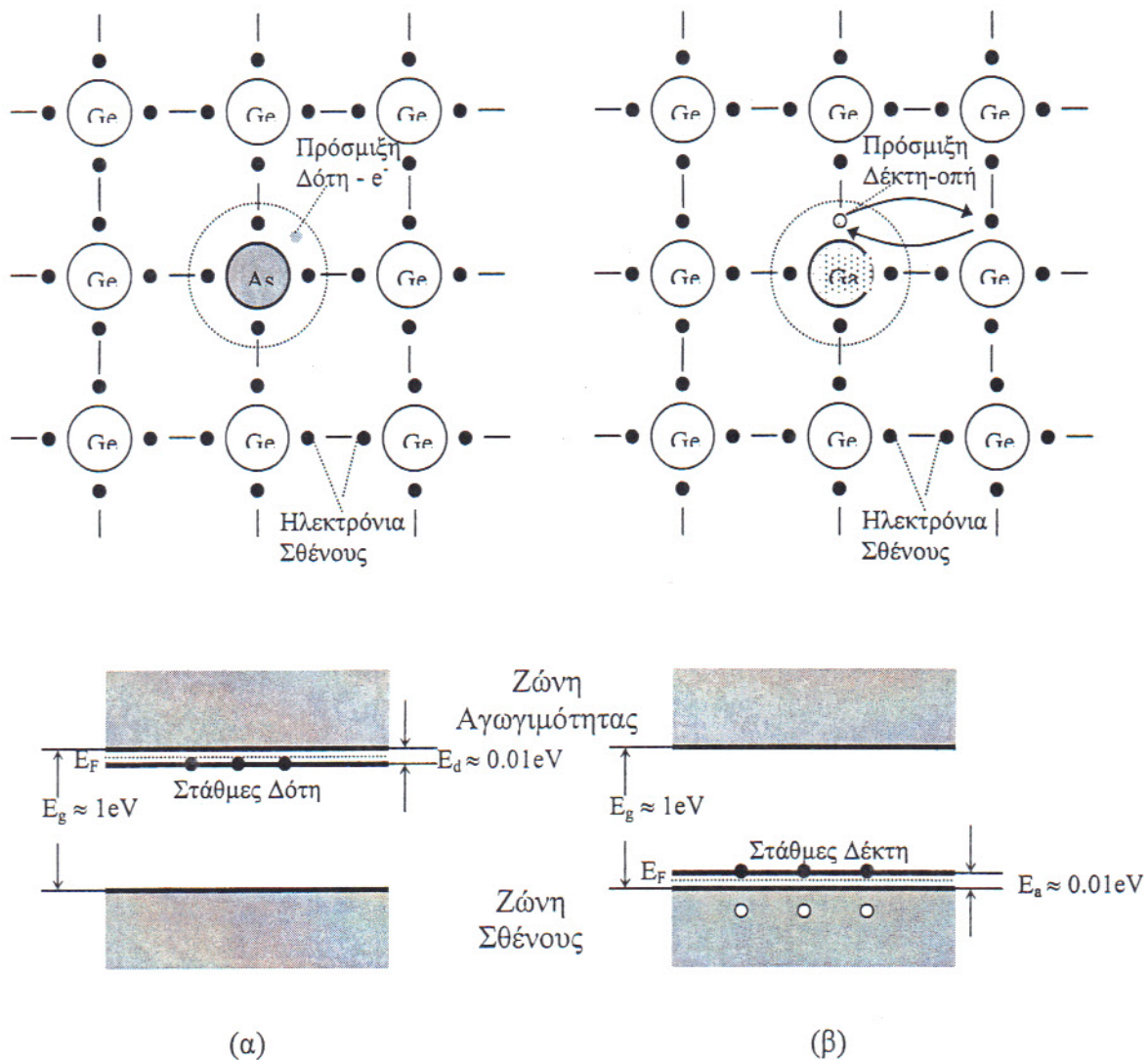
όπου k = σταθερά του Boltzmann, T = απόλυτη θερμοκρασία και E_g = εύρος του ενεργειακού χάσματος. Σε θερμοκρασίες χαμηλότερες εκείνων της περιοχής της ενδογενούς αγωγιμότητας του ημιαγωγού, η αγωγιμότητα οφείλεται κυρίως στις προσμίξεις. Στην περίπτωση αυτή ομιλούμε για *εξωγενή αγωγιμότητα* ή *αγωγιμότητα προσμίξεων* (extrinsic conductivity ή impurity conductivity).

Ας θεωρήσουμε ένα ημιαγωγό όπως π.χ. το Ge (γερμάνιο) που ανήκει στην IV ομάδα του περιοδικού συστήματος των στοιχείων. Το Ge έχει τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική ηλεκτρονική του υποστιβάδα (στις στάθμες 4S και 4P), κρυσταλλώνεται στο εδροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα (fcc) (όμοιο με εκείνο του αδάμαντα) και σχηματίζει ομοιοπολικούς δεσμούς. Τα άτομα στο κρυσταλλικό πλέγμα του Ge, κατέχουν το κέντρο και τις τέσσερις κορυφές ενός κανονικού τετραέδρου, σχηματίζοντας ομοιοπολικό δεσμό, με καθένα από τους πλησιέστερους γείτονες (Σχ. 3.5).



Σχήμα 3.5. Κρυσταλλικό πλέγμα του αδάμαντα, Ge, ή Si.

Αν το γερμάνιο αναμειχθεί με μικρή ποσότητα στοιχείων της ομάδας V του περιοδικού συστήματος, όπως π.χ. το As (αρσενικό) με πέντε ηλεκτρόνια σθένους, λαμβάνουμε ένα ημιαγωγό υλικό τύπου *n* (Σχ. 3.6α), ενώ αν το γερμάνιο αναμειχθεί με μικρή ποσότητα στοιχείων της ομάδας III του περιοδικού συστήματος όπως π.χ. το Ga (γάλλιο) με τρία ηλεκτρόνια σθένους, λαμβάνουμε ένα ημιαγωγό τύπου *p* (Σχ. 3.6β). Τα δύο είδη προσμίξεων τύπου *n* (As) και τύπου *p* (Ga) ονομάζονται *δότες* (donors) και *δέκτες* (acceptors), αντίστοιχα.



Σχήμα 3.6. (α) Ημιαγωγός τύπου n, (β) Ημιαγωγός τύπου p

Στο διάγραμμα των ενεργειακών ζωνών για ένα ημιαγωγό τύπου n, οι στάθμες των δοτών, βρίσκονται λίγο χαμηλότερα από τη ζώνη αγωγιμότητας και εντός της απαγορευμένης ζώνης (Σχ. 3.6α), ενώ για ένα ημιαγωγό τύπου p, οι στάθμες των δεκτών βρίσκονται μόλις λίγο ψηλότερα από τη ζώνη σθένους και εντός της απαγορευμένης ζώνης (Σχ. 3.6β).

Σε ένα οποιοδήποτε ημιαγωγό στη θερμοκρασία δωματίου, πολύ λίγα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους θα μετακινηθούν στη ζώνη αγωγιμότητας. Αν ο ημιαγωγός είναι τύπου n, η πλειονότητα των φορέων φορτίου της ζώνης αγωγιμότητας, θα είναι ηλεκτρόνια που προέρχονται από τους δότες. Αν ο ημιαγωγός είναι τύπου p, η πλειονότητα των φορέων φορτίου θα είναι οπές που βρίσκονται στη ζώνη σθένους και οι οποίες δημιουργήθηκαν από τη διαφυγή των ηλεκτρονίων της ζώνης σθένους και την παγίδευσή τους στη στάθμη των δεκτών. Όταν μιλάμε συνεπώς για ευκινησίες και συγκεντρώσεις φορέων φορτίου ενός ημιαγωγού, αναφερόμαστε πάντοτε στους φορείς της πλειονότητας.

3.3. Μέθοδος

Η αρχή του φαινομένου Hall περιγράφεται στο γενικό μέρος (βλ. παράγρ.3.2).

3.3.1. Μέτρηση της τάσεως Hall u_H συναρτήσει του ρεύματος I , που διαρρέει τον κρύσταλλο p -Ge

Το ρεύμα I που διαρρέει τον κρύσταλλο p -Ge λαμβάνεται από τη έξοδο ενός ανορθωτικού συστήματος (βλ. Σχ. 3.7). Η ένταση του ρεύματος I μπορεί να μεταβληθεί με τη βοήθεια του ποτενσιόμετρου (500 Ω).

Το απαιτούμενο μαγνητικό πεδίο B στο χώρο του κρυστάλλου δημιουργείται από ένα ηλεκτρομαγνήτη, ο οποίος τροφοδοτείται από τη έξοδο DC του τροφοδοτικού. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου B μπορεί να μεταβάλλεται και μετρείται με τον μετρητή μαγνητικού πεδίου «Teslameter».

Η τάση Hall U_H που εμφανίζεται στον κρύσταλλο μετρείται με ένα βολτόμετρο (υποδοχές E και D της πλακέτας, Σχ. 3.8).

3.3.2. Μέτρηση της αγωγιμότητας του κρυστάλλου p -Ge συναρτήσει της θερμοκρασίας

Αποσυνδέουμε τους ηλεκτρομαγνήτες από το τροφοδοτικό και απομακρύνουμε τους πόλους των. Έτσι το μαγνητικό πεδίο μηδενίζεται.

Η τάση θέρμανσης και επομένως το ρεύμα θέρμανσης του κρυστάλλου, λαμβάνεται από το τροφοδοτικό (θέση DC) και ρυθμίζεται με το «κομβία A». Η θερμοκρασία του κρυστάλλου μετρείται με ένα θερμοζεύγος Cu-CuNi σε συνδυασμό με ένα μιλιβολτόμετρο. Η μία από τις κλίμακες του μιλιβολτομέτρου είναι βαθμολογημένη σε βαθμούς κελσίου ($^{\circ}\text{C}$). Η αγωγιμότητα του κρυστάλλου p -Ge στην περιοχή $20^{\circ}\text{C} - 175^{\circ}\text{C}$ είναι ενδογενής (intrinsic conductivity) και δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \sigma_0 e^{-E_g / 2kT}$$

όπου σ_0 η αγωγιμότητα του κρυστάλλου στη θερμοκρασία δωματίου ($T = 300\text{ K}$), E_g το εύρος του ενεργειακού χάσματος, T η απόλυτη θερμοκρασία και $k = 8,625 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ η σταθερά του Boltzmann. Από την εξίσωση αυτή προκύπτει

$$\ln \sigma = \ln \sigma_0 - \frac{E_g}{2k} T^{-1},$$

και επομένως η γραφική παράσταση του λογαρίθμου της αγωγιμότητας συναρτήσει του αντιστρόφου της θερμοκρασίας είναι μια ευθεία γραμμή, της οποίας η κλίση ισούται με

$$b = -\frac{E_g}{2k}.$$

Από την τελευταία σχέση προσδιορίζεται το ενεργειακό χάσμα E_g του κρυστάλλου, αφού πρώτα υπολογιστεί η κλίση b της ευθείας γραμμής.

Μετρούμε την τάση V στα άκρα του κρυστάλλου ενώ συγχρόνως τον θερμαίνουμε. Η τάση αυτή είναι ίση με $V = IR$. Επειδή όμως $R = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{d}$ και τα I και d (πάχος του κρυστάλλου) είναι σταθερά συνάγεται ότι:

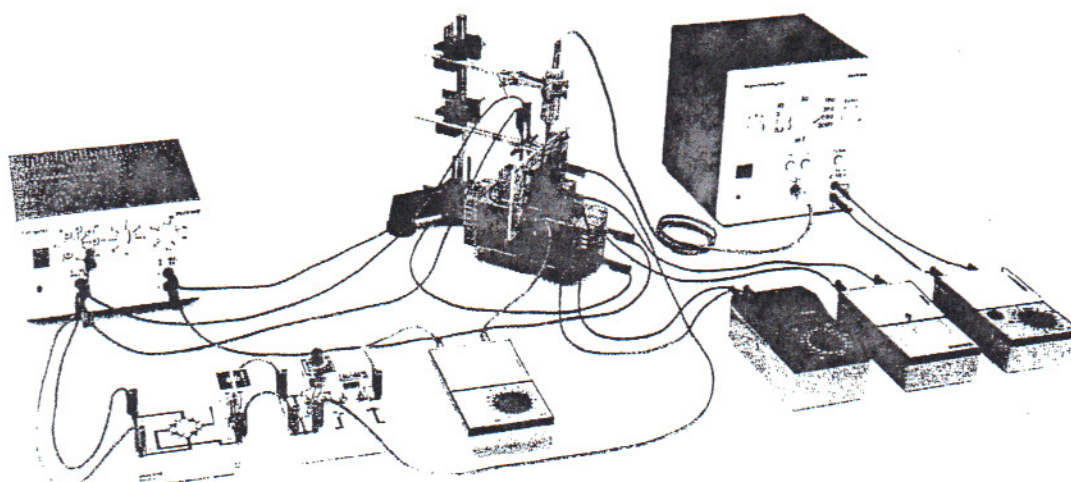
$$V^{-1} \propto \sigma,$$

δηλαδή το αντίστροφο της τάσης στα άκρα του κρυστάλλου είναι ανάλογο της αγωγιμότητας.

3.4 Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη (Σχ. 3.7) αποτελείται από τα εξής βασικά μέρη:

- (1) Το τροφοδοτικό χαμηλής τάσεως AC και DC.
- (2) Το σύστημα ανόρθωσης εναλλασσόμενου ρεύματος,
- (3) Τον ηλεκτρομαγνήτη παραγωγής μαγνητικού πεδίου,
- (4) Την πλακέτα με τον κρύσταλλο p-Ge και την περιέλιξη θέρμανσής του,
- (5) Τον μετρητή μαγνητικού πεδίου «Teslameter»,
- (6) Το αμπερόμετρο,
- (7) Το βολτόμετρο για τη μέτρηση της τάσης Hall,
- (8) Το μιλιβολτόμετρο το βαθμολογημένο σε °C (θερμόμετρο) κατάλληλο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του κρυστάλλου κατά τη θέρμανσή του.



Σχήμα 3.7. Γενική εικόνα της πειραματικής διάταξης

Το ηλεκτρικό διάγραμμα του ανορθωτικού συστήματος που παρέχει το ρυθμιζόμενο συνεχές ρεύμα που διαρρέει τον κρύσταλλο p-Ge, φαίνεται στο Σχ. 3.8.

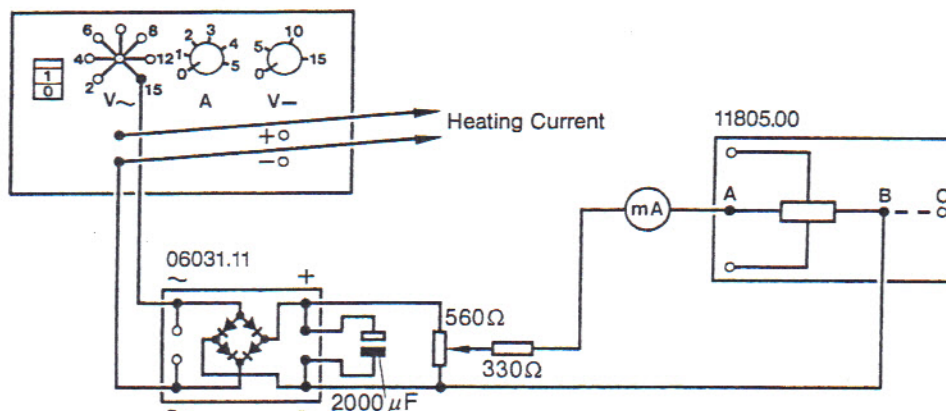
1. Το τροφοδοτικό χαμηλής τάσης έχει δύο εξόδους, AC και DC. Η έξοδος AC παρέχει ποικιλία τάσεων 2, 4, 6, 8, ...15 V, που μπορούμε να επιλέξουμε με την κατάλληλη θέση ενός διχαλωτού επιλογέα. Η έξοδος AC συνδέεται μόνιμα με την είσοδο του ανορθωτικού συστήματος.

Η έξοδος DC χρησιμεύει ως πηγή του ρεύματος που διαρρέει:

- (α) Το κύκλωμα του ηλεκτρομαγνήτη που δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο B και
- (β) το κύκλωμα θέρμανσης του κρυστάλλου. Όταν η έξοδος DC χρησιμοποιείται για τη θέρμανση του κρυστάλλου αποσυνδέεται το κύκλωμα του ηλεκτρομαγνήτη. Η τάση της εξόδου DC μπορεί να μεταβληθεί με τα «κομβία V και A».

2. Το ανορθωτικό σύστημα αποτελείται από μια γέφυρα διόδων και ένα ηλεκτρολυτικό πυκνωτή 2000 μF που χρησιμεύει για την εξομάλυνση του ανορθωμένου ρεύματος. Η ένταση του ανορθωμένου ρεύματος ρυθμίζεται με τη βοήθεια ενός κυκλικού ποτενσιομέτρου (αντίσταση 500 Ω). Για να αποφευχθεί η υπέρβαση της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής του ρεύματος 50 mA που πρέπει να

διαρρέει τον κρύσταλλο p-Ge, συνδέεται στο ένα άκρο εξόδου του ποτενσιομέτρου μια αντίσταση 330 Ω.



Σχήμα 3.8. Ηλεκτρικό διάγραμμα ανορθωτικού συστήματος.

3. Ο ηλεκτρομαγνήτης παραγωγής του μαγνητικού πεδίου B, αποτελείται από ένα πυρήνα σε σχήμα U (υοειδής) με δύο κυκλικές περιελίξεις σε κάθε σκέλος του. Οι δύο περιελίξεις συνδέονται σε σειρά. Στις δύο καταληκτικές κορυφές του πυρήνα ενσφηνώνονται δύο παραλληλεπίπεδοι πόλοι από σίδηρο για τον περιορισμό του μαγνητικού πεδίου στο χώρο του κρυστάλλου.
4. Η μονωτική πλακέτα περιλαμβάνει τον κρύσταλλο p-Ge, με την κατάλληλη περιέλιξη για τη θέρμανσή του. Επιπλέον, περιλαμβάνει και βοηθητικό κύκλωμα (Trimmer) που χρησιμεύει ώστε ο κρύσταλλος να διαρρέεται με σταθερό ρεύμα ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία του.
5. Το μαγνητικό πεδίο μετρείται με τον ψηφιακό μετρητή μαγνητικού πεδίου «Teslameter», αφού πρώτα προσαρμόσουμε σε αυτόν μια προέκταση (probe Hall), της οποίας το άλλο άκρο εισάγεται στο κέντρο της περιοχής του μαγνητικού πεδίου. Ο Teslameter ρυθμίζεται στο μηδέν πριν μετρήσουμε το πεδίο.
6. Το αμπερόμετρο συνδέεται σε σειρά στο κύκλωμα του κρυστάλλου (προσοχή το ρεύμα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 50 mA).
7. Το βολτόμετρο για τη μέτρηση της τάσεως Hall είναι ψηφιακό (επιλέγεται η περιοχή συνεχούς τάσης V=2 volt).
8. Το μιλливολτόμετρο, το βαθμολογημένο σε °C (θερμόμετρο) συνδέεται στα άκρα θερμοζεύγους Cu/CuNi που είναι σε επαφή με τον κρύσταλλο και βρίσκεται πάνω στη μονωτική πλακέτα.

Βιβλιογραφία

1. C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*. Θεωρία ζωνών. Ημιαγωγοί. Φαινόμενο Hall.
2. H. Young, *Πανεπιστημιακή Φυσική*. Τόμος Β': Ηλεκτρομαγνητισμός - Οπτική - Σύγχρονη Φυσική. Κεφ. 44, Μόρια και συμπτυκνωμένη ύλη. Δομή στερεών. Ενεργειακές ζώνες. Ημιαγωγοί.

3.5 Εκτέλεση

3.5.1. Μέτρηση της τάσεως Hall U_H συναρτήσει του ρεύματος I που διαρρέει τον κρύσταλλο p -Ge. (βλ. Παράγρ. 3.3α)

Για θερμοκρασία του κρυστάλλου $T=300$ K (θερμοκρασία δωματίου) εφαρμόζουμε ομογενές μαγνητικό πεδίο $B=250$ mT. Διαβιβάζουμε ρεύμα μεταξύ των άκρων του κρυστάλλου (υποδοχές A και B). Μεταβάλλουμε την ένταση του ρεύματος με το ποτενσιόμετρο 500Ω και για τις τιμές που φαίνονται στον Πίνακα 3.I μετράμε την τάση Hall U_H (σε mV) στα άκρα του κρυστάλλου (υποδοχές E και D).

Πίνακας 3.I

| I(mA) | U_H (mV) |
|-------|------------|
| -30 | |
| -25 | |
| -20 | |
| -15 | |
| -10 | |
| -5 | |
| 0 | |

Πίνακας 3.II

| I(mA) | U_H (mV) |
|-------|------------|
| 5 | |
| 10 | |
| 15 | |
| 20 | |
| 25 | |
| 30 | |
| | |

Αλλάζουμε την πολικότητα του ρεύματος στην πλακέτα p -Ge, επιλέγουμε τις τιμές του ρεύματος του Πίνακα 3.II και μετρούμε εκ νέου την τάση Hall.

3.5.2. Μέτρηση της αγωγιμότητας του κρυστάλλου p -Ge συναρτήσει της θερμοκρασίας του (βλ. παράγρ. 3.3β)

Μηδενίζουμε το μαγνητικό πεδίο ($B=0$) και ακολούθως διαβιβάζουμε σταθερό ρεύμα $I=30$ mA διαμέσου του κρυστάλλου (υποδοχές A και C). Αν δεν επιτυγχάνεται η τιμή των 30 mA, επεμβαίνουμε ρυθμίζοντας το «Trimmer» που βρίσκεται στο βοηθητικό κύκλωμα πάνω στην πλακέτα. Μετρούμε την τάση V στα άκρα του κρυστάλλου (υποδοχές A και B της πλακέτας) για τις τιμές της θερμοκρασίας που φαίνονται στον Πίνακα 3.III.

Πίνακας 3.III

| $\theta^\circ\text{C}$ | $T(^{\circ}\text{K})$ | $1000/T$ (K^{-1}) | V (mV) | $V^{-1} \sim \sigma$ | $\ln V^{-1}$ |
|------------------------|-----------------------|------------------------------|----------|----------------------|--------------|
| 30 | | | | | |
| 40 | | | | | |
| 50 | | | | | |
| 60 | | | | | |
| 70 | | | | | |
| 80 | | | | | |
| 90 | | | | | |
| 100 | | | | | |
| 110 | | | | | |
| 120 | | | | | |
| 130 | | | | | |
| 140 | | | | | |
| 150 | | | | | |
| 160 | | | | | |
| 170 | | | | | |

3.6 Επεξεργασία των μετρήσεων

1. Παραστήσατε γραφικά την τάση Hall U_H συναρτήσει του ρεύματος I από τα δεδομένα των Πινάκων I και II. Η γραφική παράσταση αναμένεται να είναι μια ευθεία γραμμή:

$$U_H = U_H + bI$$

Υπολογίστε την κλίση $b = \frac{\Delta U_H}{\Delta I}$ της ευθείας καθώς και το σφάλμα S_b .

$$b \pm S_b$$

2. Υπολογίστε τον συντελεστή Hall R_H από τη σχέση:

$$R_H = \frac{U_H}{I} \cdot \frac{d}{B} = b \cdot \frac{d}{B}$$

όπου b η κλίση της ευθείας $U_H = U_H(I)$, $d=1\text{mm}$ το πάχος του κρυστάλλου p-Ge και $B=250\text{mT}$.

3. Υπολογίστε την αγωγιμότητα σ_0 του κρυστάλλου σε θερμοκρασία δωματίου ($T=300\text{K}$) από την ακόλουθη σχέση

$$\sigma_0 = \frac{l}{R_0 A}$$

όπου $l=2 \cdot 10^{-2}\text{m}$ το μήκος του κρυστάλλου,
 $A=l \cdot d=10^{-2}\text{m} \cdot 10^{-3}\text{m}=10^{-5}\text{m}^2$ η διατομή του κρυστάλλου,
 και $R_0=55\ \Omega$ η αντίσταση του κρυστάλλου που δίδεται ή που μπορεί να μετρηθεί με ένα ωμόμετρο.

4. Υπολογίστε την ευκινησία μ_H (mobility) των φορέων φορτίου του κρυστάλλου (οπών) από τη σχέση:

$$\mu_H = R_H \sigma_0$$

5. Υπολογίστε τη συγκέντρωση των φορέων φορτίου (οπών) του κρυστάλλου με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$p = \frac{1}{e \cdot R_H}$$

όπου $e = 1.6 \cdot 10^{-19}\text{C}$, το φορτίο του ηλεκτρονίου και R_H ο συντελεστής Hall.

6. Παραστήσατε γραφικά το $\ln V^{-1}$ συναρτήσει του αντιστρόφου της θερμοκρασίας ($10^3\text{T}^{-1}\text{K}^{-1}$). Η καμπύλη που θα προκύψει πρέπει να είναι ευθεία γραμμή με κλίση b , τέτοια ώστε:

$$b = -\frac{E_g}{2k}$$

Από τη σχέση αυτή υπολογίστε το εύρος του ενεργειακού χάσματος E_g του κρυστάλλου p-Ge.