

Άσκηση 5

Μέτρηση της φωτοαγωγιμότητας του CdS συναρτήσει της έντασης και της συχνότητας της ακτινοβολίας διέγερσης

5.1. Σκοπός.

Υπολογισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης ρεύματος – τάσης, σε φωτοαντιστάτη CdS που διεγείρεται με οπτική ακτινοβολία στην περιοχή του ορατού φάσματος. Μελέτη της φωτοαγωγιμότητας και της εξάρτησης του φαινομένου από την ένταση και το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

5.2. Γενικά

5.2.1. Εισαγωγή

Το φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας (ή εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο) παρατηρείται κυρίως σε ημιαγωγούς και αφορά την αύξηση της ηλεκτρικής τους αγωγιμότητας λόγω απορρόφησης ακτινοβολίας. Για να παρατηρηθεί αυτό το φαινόμενο θα πρέπει η ενέργεια της απορροφούμενης ακτινοβολίας να είναι μεγαλύτερη από το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Σε αυτή τη περίπτωση ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους διεγείρονται στη ζώνη αγωγιμότητας ενώ παράλληλα δημιουργούνται οπές στη ζώνη σθένους. Έτσι, οι ελεύθεροι φορείς που δημιουργούνται, ηλεκτρόνια και οπές, αυξάνουν σημαντικά την αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Η χρονική διάρκεια παραμονής των ηλεκτρονιακών φορέων στη διεγερμένη κατάσταση είναι στατιστικής φύσεως διαδικασία και εξαρτάται από τη πιθανότητα επανασύνδεσής τους με τις οπές. Τελικά το σύστημα οδηγείται σε κατάσταση ισορροπίας, όταν ο αριθμός των φορέων που δημιουργούνται γίνει ίσος με τον αριθμό εκείνων που επανασυνδέονται. Η επανασύνδεση συνοδεύεται με μετάδοση ενέργειας στον κρύσταλλο μέσω ταλαντώσεων του κρυσταλλικού πλέγματος (φωνονιακή αποδιέγερση) ή εκπομπή ακτινοβολίας (φωτονική αποδιέγερση). Το φαινόμενο της φωτοαγωγιμότητας βρίσκει ιδιαίτερη εφαρμογή σε φωτοβολταϊκά στοιχεία, ηλιακές κυψέλες, ανιχνευτές υπερέυθρου, φωτοαντιγραφικές διατάξεις κ.α.

5.2.2. Θεμελιώδης απορρόφηση ακτινοβολίας.

Σ' ένα ημιαγωγίμο υλικό, κατά τη θεμελιώδη φωτονική απορρόφηση, ένα ηλεκτρόνιο από τη ζώνη σθένους αποκτά την ενέργεια ενός προσπίπτοντος φωτονίου και μεταβαίνει στη ζώνη αγωγιμότητας. Προφανώς, για να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη διέγερση είναι απαραίτητο η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου $h\nu$ να υπερβαίνει το ενεργειακό χάσμα, E_g , του υλικού. Το γεγονός αυτό θέτει ένα κατώτερο **φραγμό στη συχνότητα απορρόφησης** του φωτονίου ίσο με $\nu = E_g/h$.

Κατά τη μετάβαση αυτή διατηρείται η ενέργεια και η ορμή του συστήματος. Επομένως όταν ένα φωτόνιο με κυματόνυσμα q και συχνότητα ν προκαλεί τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους (ν) στη ζώνη αγωγιμότητας (c) ισχύει:

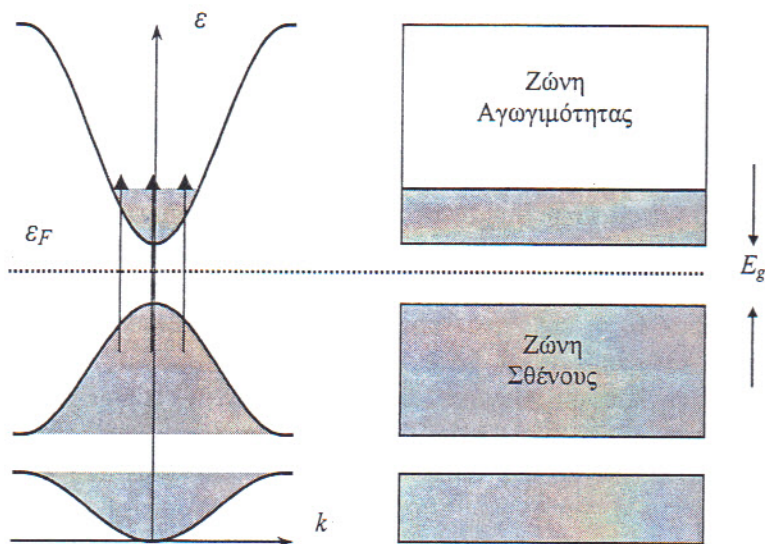
$$E_c = E_\nu + h\nu \quad \text{και} \quad \mathbf{k}_c = \mathbf{k}_\nu + \mathbf{q}, \quad (5.1)$$

όπου $\mathbf{k}_c, \mathbf{k}_\nu$ το κυματόνυσμα και E_c, E_ν η ενέργεια του ηλεκτρονίου στη ζώνη αγωγιμότητας και στη ζώνη σθένους αντίστοιχα.

Όμως το μήκος κύματος του φωτονίου είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό του ηλεκτρονίου. Αυτό σημαίνει ότι το \mathbf{q} είναι πρακτικά ασήμαντο σε σχέση με το \mathbf{k}_c και επομένως η συνθήκη διατήρησης της ορμής επιβάλλει ότι:

$$\mathbf{k}_c \approx \mathbf{k}_\nu \quad (5.2)$$

Η παραπάνω συνθήκη υποδηλώνει ότι μόνο διεγέρσεις ηλεκτρονίων με σταθερό \mathbf{k} επιτρέπονται από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, όπως δείχνουν τα κατακόρυφα βέλη στο διάγραμμα του Σχ. 5.1 που παριστάνουν τις διεγέρσεις των ηλεκτρονίων.



Σχήμα 5.1. Φωτονικές διεγέρσεις στο άμεσο ενεργειακό χάσμα ενός ημιαγωγού. Μόνο διεγέρσεις ηλεκτρονίων με σταθερή κρυσταλλική ορμή $\eta \mathbf{k}$ επιτρέπονται προς τη ζώνη αγωγιμότητας, ενώ σπές δημιουργούνται στη ζώνη σθένους. Ηλεκτρόνια ή σπές καταλαμβάνουν μόνο τις σκιασμένες περιοχές στις ενεργειακές ζώνες του σχήματος.

Με βάση το ενεργειακό διάγραμμα του Σχήματος 5.1, ο αριθμός των ηλεκτρονίων που μεταβαίνουν στη ζώνη αγωγιμότητας αυξάνεται όταν αυξάνει η ενέργεια διέγερσης των φωτονίων ώστε να καλύπτονται συνεχώς και υψηλότερες ενεργειακά στάθμες στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτό σημαίνει ότι με αυξανόμενη ενέργεια

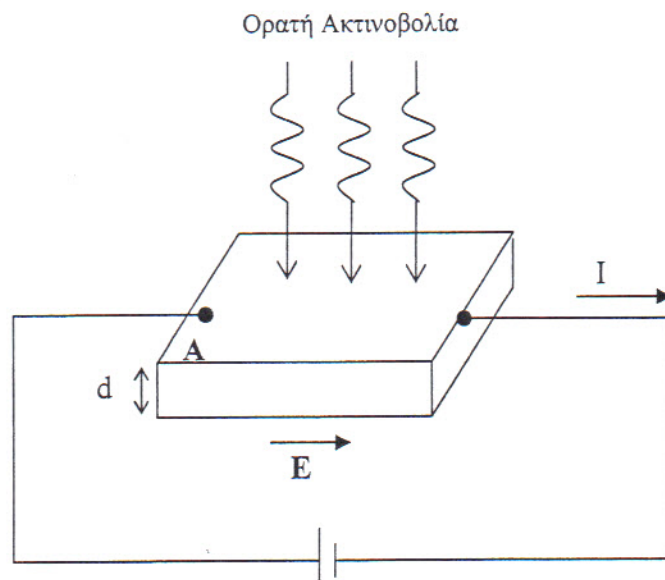
διέγερσης, η απορρόφηση της ακτινοβολίας γίνεται πιο έντονη και ο **συντελεστής απορρόφησης α** αυξάνει συνεχώς. Για ημιαγωγούς που παρουσιάζουν άμεσο ενεργειακό χάσμα, ο συντελεστής απορρόφησης δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\alpha = L(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (5.3)$$

όπου L είναι μια σταθερά που εξαρτάται από τη μορφή των ενεργειακών ζωνών του ημιαγωγού.

5.2.3. Συγκέντρωση φορέων σε ημιαγωγό που υφίσταται φωτονική διέγερση.

Έστω η απλουστευμένη διάταξη του Σχήματος 5.2 όπου μια επιφάνεια ενός κρυστάλλου ημιαγωγού ακτινοβολείται σε διεύθυνση κάθετη ως προς τη διεύθυνση ενός εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου, και συνεπώς στη διεύθυνση του ρεύματος I .



Σχήμα 5.2. Σχηματική διάταξη πειράματος φωτοαγωγιμότητας σε ημιαγωγό.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, κατά τη διάρκεια της ακτινοβολίας ενός ημιαγωγού εμφανίζονται φαινόμενα γένεσης και επανασύνδεσης φορέων. Η συζήτηση παρακάτω αφορά ηλεκτρονιακούς φορείς, ωστόσο ανάλογες σχέσεις ισχύουν και για τις οπές.

α) **Γένεση φορέων:** Ο βασικός μηχανισμός ύπαρξης φορέων στους ενδογενείς ημιαγωγούς είναι η θερμική ενέργεια των ηλεκτρονίων που τους δίνει τη δυνατότητα να μεταβαίνουν από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας με ρυθμό μετάβασης ανά μονάδα όγκου, g_0 . Όταν τώρα μια επιφάνεια του ημιαγωγού ακτινοβολείται, προκαλείται επιπλέον φωτονική διέγερση ηλεκτρονίων, με ρυθμό g .

Για ένα υλικό διαφανές στην ακτινοβολία, το κλάσμα της ακτινοβολίας που απορροφάται από το υλικό είναι ίσο με $\alpha(\omega)d$, όπου d και $\alpha(\omega)$ το πάχος και ο συντελεστής απορρόφησης του υλικού που όπως διαπιστώθηκε στη παράγραφο 5.2.2 εξαρτάται από τη συχνότητα. Επομένως, αν $I(\omega)$ η ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στην επιφάνεια του υλικού με εμβαδόν A , $I(\omega)A$ είναι η ισχύς της ακτινοβολίας και $I(\omega)\alpha(\omega)dA$ η ισχύς που απορροφάται από το υλικό. Εφόσον κάθε φωτόνιο έχει ενέργεια $h\omega$, ο συνολικός αριθμός των φωτονίων που απορροφούνται από το υλικό ανά μονάδα χρόνου είναι:

$$N(\omega) = \frac{I(\omega)\alpha(\omega)Ad}{\eta\omega} \quad (5.4)$$

Στα διαφανή υλικά, ο ρυθμός φωτονικής γένεσης ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου g είναι σε καλή προσέγγιση σταθερός, ανεξάρτητα από την ένταση και το βάθος διείσδυσης της ακτινοβολίας. Άρα:

$$g = \frac{N(\omega)}{Ad} = \frac{\alpha(\omega)I(\omega)}{\eta\omega} \quad (5.5)$$

β) **Επανασύνδεση φορέων:** Ο ρυθμός επανασύνδεσης φορέων συνδέεται με το μέσο χρόνο ζωής τους, τ_n για τα ηλεκτρόνια. Ο χρόνος αυτός είναι πρακτικά ανεξάρτητος από τη συγκέντρωση των φορέων. Επομένως, για ηλεκτρονική συγκέντρωση n (ανά μονάδα όγκου), το πλήθος των ηλεκτρονίων που επανασυνδέονται ανά μονάδα χρόνου και όγκου, είναι ίσο με n/τ_n .

Η χρονική μεταβολή της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων δίνεται από το αλγεβρικό άθροισμα των ρυθμών γένεσης και επανασύνδεσης φορέων ως:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g + g_0 - \frac{n}{\tau_n} \quad (5.6)$$

Σε συνθήκες ισορροπίας $\frac{\partial n}{\partial t} = 0$, επομένως,

$$g + g_0 = \frac{n}{\tau_n} \quad (5.7)$$

Όταν δεν έχουμε φωτονική διέγερση η σχέση γίνεται

$$g_0 = \frac{n_0}{\tau_n} \quad (5.8)$$

όπου n_0 η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων σε θερμική ισορροπία.

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (5.5), (5.7) και (5.8) προσδιορίζεται η αύξηση της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων εξαιτίας της φωτονικής διέγερσης του ημιαγωγού.

$$n - n_0 = g\tau_n = \frac{\alpha(\omega)I(\omega)\tau_n}{\eta\omega} \quad (5.9)$$

5.2.4. Υπολογισμός της φωτοαγωγιμότητας.

Η αγωγιμότητα σ ενός ημιαγωγού οφείλεται στη κίνηση τόσο των ηλεκτρονίων όσο και των οπών. Στη περίπτωση των ενδογενών ημιαγωγών όπου η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων n είναι ίση με τη συγκέντρωση των οπών p , η αγωγιμότητα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_p = ne\mu_e + pe\mu_h = ne(\mu_e + \mu_h) \quad (5.10)$$

όπου μ_e και μ_h η ευκινησία των ηλεκτρονίων και των οπών αντίστοιχα.

Από τη σχέση (5.10) υπολογίζεται η αγωγιμότητα σ_0 σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας ως:

$$\sigma_0 = n_0 e (\mu_e + \mu_h) \quad (5.11)$$

Με βάση αυτή τη σχέση προκύπτει η ολική αγωγιμότητα του ημιαγωγού ως άθροισμα της θερμοεπαγόμενης αγωγιμότητας σ_0 και της φωτοαγωγιμότητας σ_{ph} .

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_{ph} = \sigma_0 + (n - n_0) e(\mu_e + \mu_h) \quad (5.12)$$

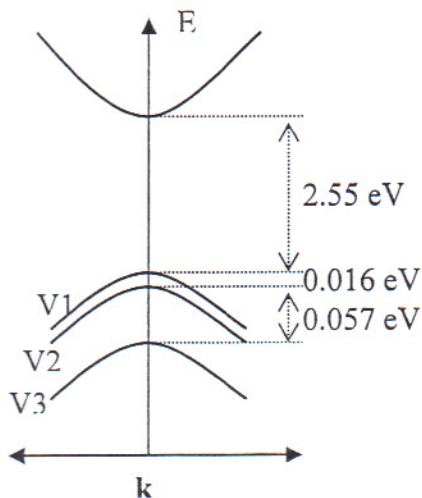
Συνδυάζοντας τις σχέσεις (5.9) και (5.12) προκύπτει η σχέση που δίνει τη φωτοαγωγιμότητα.

$$\sigma_{ph} = \frac{\alpha(\omega) I(\omega) e \tau_n (\mu_e + \mu_h)}{q \omega} \quad (5.13)$$

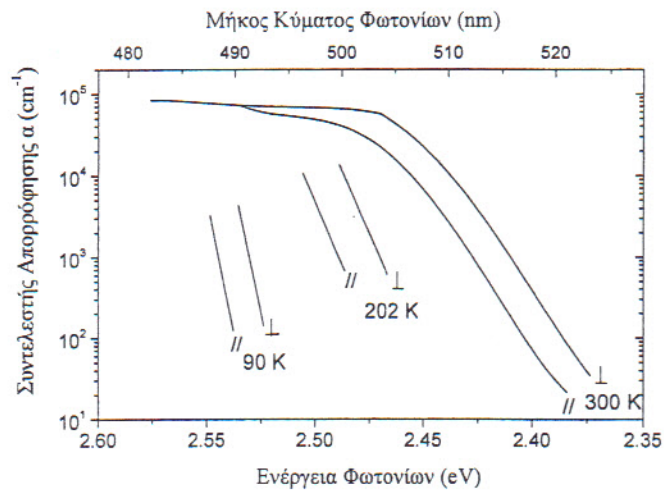
Όπως φαίνεται από τη παραπάνω σχέση, για συγκεκριμένη συχνότητα ω των φωτονίων διέγερσης, η εξάρτηση της φωτοαγωγιμότητας σ_{ph} από την ένταση της ακτινοβολίας I είναι γραμμική. Η εξάρτηση της σ_{ph} από τη συχνότητα ω , για σταθερή ένταση ακτινοβολίας, είναι ανάλογη του $\alpha(\omega)/\omega$ και εκδηλώνεται κυρίως από την απότομη μεταβολή της συνάρτησης $\alpha(\omega)$, του συντελεστή απορρόφησης.

5.2.5. Η ενεργειακή δομή του CdS

Στο ακόλουθο Σχήμα 5.3(α), παρουσιάζεται το ενεργειακό διάγραμμα των ζωνών αγωγιμότητας και σθένους στο CdS κοντά στο κέντρο της ζώνης Brillouin. Όπως φαίνεται, οι ζώνες σθένους χωρίζονται σε υπο-ζώνες. Η στάθμη V3 διαχωρίζεται από τις V1 και V2 εξαιτίας της αλληλεπίδρασης σπιν-τροχιακού (spin-orbit interaction) των δέσμιων ηλεκτρονίων που συμμετέχουν στους δεσμούς των ατόμων. Οι στάθμες V1 και V2 διαχωρίζονται περαιτέρω εξαιτίας της επίδρασης του κρυσταλλικού πεδίου.



(α)



(β)

Σχήμα 5.3. (α) Ενεργειακό διάγραμμα του CdS σε χαμηλή θερμοκρασία και (β) εξάρτηση του συντελεστή απορρόφησης του CdS από την ενέργεια των φωτονίων διέγερσης, σε διαφορετικές θερμοκρασίες και με διαφορετικές πολώσεις της ακτινοβολίας ως προς τον άξονα c του κρυστάλλου.

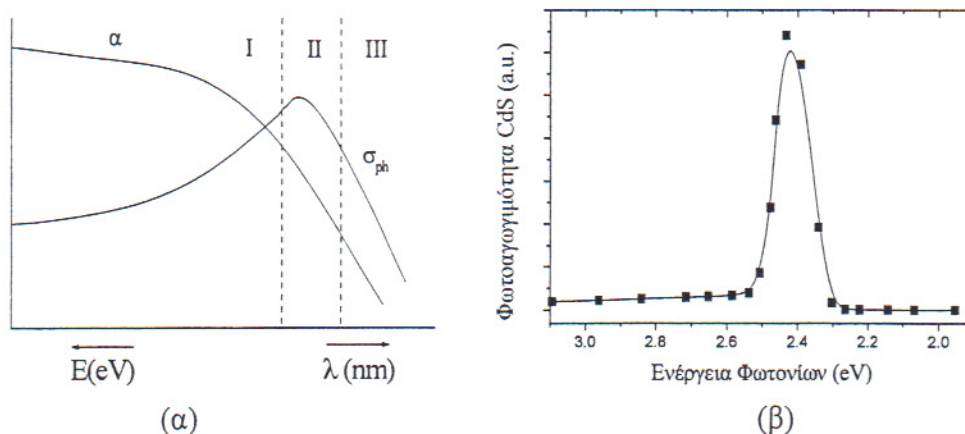
Η εξάρτηση του συντελεστή απορρόφησης από τη συχνότητα διέγερσης δίνεται στο Σχήμα 5.3(β) για τρεις διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας 90, 202 και 300 K. Σε κάθε

περίπτωση κοντά στο φραγμό απορρόφησης, το α αυξάνει με την ενέργεια του φωτονίου σύμφωνα με τη σχέση (5.3).

Χαρακτηριστική είναι επίσης η διαφορετική τιμή στο φραγμό απορρόφησης όταν η πόλωση του φωτός είναι κάθετη \perp ή παράλληλη \parallel στον κρυσταλλογραφικό άξονα c του υλικού (Η δομή του CdS είναι εξαγωνική με πλεγματικές σταθερές $a=b=4.3\text{\AA}$ και $c=7.02\text{\AA}$). Στη δεύτερη περίπτωση επιτρέπονται μόνο μεταβάσεις από τη στάθμη V2 στη ζώνη αγωγιμότητας και επομένως ο φραγμός απορρόφησης μεγαλώνει. Μια άλλη σημαντική παρατήρηση στο Σχήμα 5.3(β) είναι ότι ο συχνότητα του φραγμού απορρόφησης αυξάνει με τη μείωση της θερμοκρασίας.

5.2.6. Εξάρτηση της φωτοαγωγιμότητας από τη συχνότητα της διεγείρουσας ακτινοβολίας στο CdS.

Έχει δειχτεί στη παράγραφο 5.2.2 ότι η φωτοαγωγιμότητα εξαρτάται από τον συντελεστή απορρόφησης ενός υλικού. Στην περίπτωση όμως που το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι πολύ μικρότερο από το φραγμό απορρόφησης, ο συντελεστής απορρόφησης του ημιαγωγού γίνεται πολύ μεγάλος με αποτέλεσμα η ακτινοβολία να απορροφάται πρακτικά στην ελεύθερη επιφάνειά του. Στην ελεύθερη επιφάνεια όμως υπάρχουν πολλές ατέλειες που διευκολύνουν την επανασύνδεση των φορέων. Με βάση τη σχέση (5.13), η μείωση του τ_n οδηγεί σε μείωση της φωτοαγωγιμότητας. Έτσι στη περίπτωση του CdS, όπως και άλλων ημιαγωγών, διακρίνονται τρεις περιοχές τιμών της φωτοαγωγιμότητας όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4.



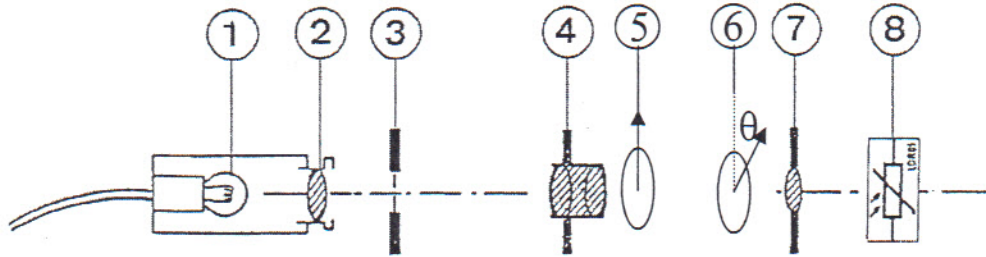
Σχήμα 5.4. α) Εξάρτηση του συντελεστή απορρόφησης α και της φωτοαγωγιμότητας σ_{ph} ημιαγωγού από το μήκος κύματος λ της διεγείρουσας ακτινοβολίας σε περιοχή τιμών κοντά στο φραγμό απορρόφησης. β) Φασματική ανάλυση της φωτοαγωγιμότητας του CdS.

Στη περιοχή I κυριαρχούν τα επιφανειακά φαινόμενα επανασύνδεσης των φορέων. Στη περιοχή II, πάνω από τον φραγμό απορρόφησης, υπάρχει ισχυρή απορρόφηση της ακτινοβολίας στο εσωτερικό του κρυστάλλου. Συνήθως η μέγιστη τιμή φωτοαγωγιμότητας εμφανίζεται σ' αυτή τη περιοχή, όταν ο συντελεστής απορρόφησης γίνει σχεδόν ίσος με την αντίστροφη τιμή του πάχους του κρυστάλλου. Στη περιοχή III η απορρόφηση της ακτινοβολίας είναι ασθενής και επομένως η φωτοαγωγιμότητα εξασθενεί.

5.3. Πειραματική διάταξη

5.3.1 Διάταξη ακτινοβολήσης ημιαγωγού για τη μέτρηση της χαρακτηριστικής καμπύλης ρεύματος-τάσης και της εξάρτησης της φωτοαγωγιμότητας του CdS από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Τα κύρια εξαρτήματα της διάταξης φαίνονται στο Σχ. 5.6 και περιγράφονται ως:



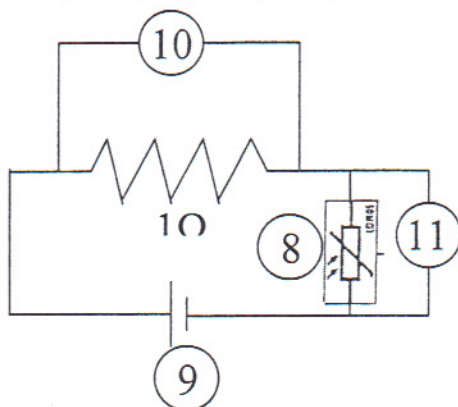
Σχήμα 5.5. Σχηματικό διάγραμμα διάταξης για την εκτέλεση του πειράματος 5.3.1.

- 1) Πηγή λευκού φωτός που τροφοδοτείται με AC τάση 6V.
- 2) Συγκενρωτικός φακός τοποθετημένος μπροστά στη πηγή.
- 3) Σχισμή μεταβλητού εύρους.
- 4) Φακός ευθυγράμμισης παράλληλης φωτεινής δέσμης.
- 5) Πολωτής.
- 6) Αναλύτης. Μεταβάλλοντας τη γωνία θ μεταξύ πολωτή και αναλύτη ελέγχεται η ένταση της διερχόμενης ακτινοβολίας, σύμφωνα με το νόμο του Malus: $I(\omega) = I_0 P \cos^2 \theta$, όπου I_0 είναι η ένταση της εισερχόμενης ακτινοβολίας και P ο συντελεστής εξασθένησης δέσμης με παράλληλα φίλτρα πόλωσης.
- 7) Συγκενρωτικός φακός εστιακής απόστασης 15 cm.
- 8) Φωτοαντιστάτης CdS, LDR 05.

5.3.2. Κύκλωμα ηλεκτρικών μετρήσεων

Το κύκλωμα περιγράφεται στο σχήμα 5.7 και αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

- 9) Πηγή συνεχούς τάσης.
- 10) Ψηφιακό μιλιβολτόμετρο παράλληλα σε πρότυπη αντίσταση $R=1\Omega$. Η πτώση τάσης στην αντίσταση σε mV αντιστοιχίζεται κατευθείαν σε τιμές ρεύματος στο κύκλωμα σε mA.
- 11) Ψηφιακό βολτόμετρο παράλληλα στον φωτοαντιστάτη.

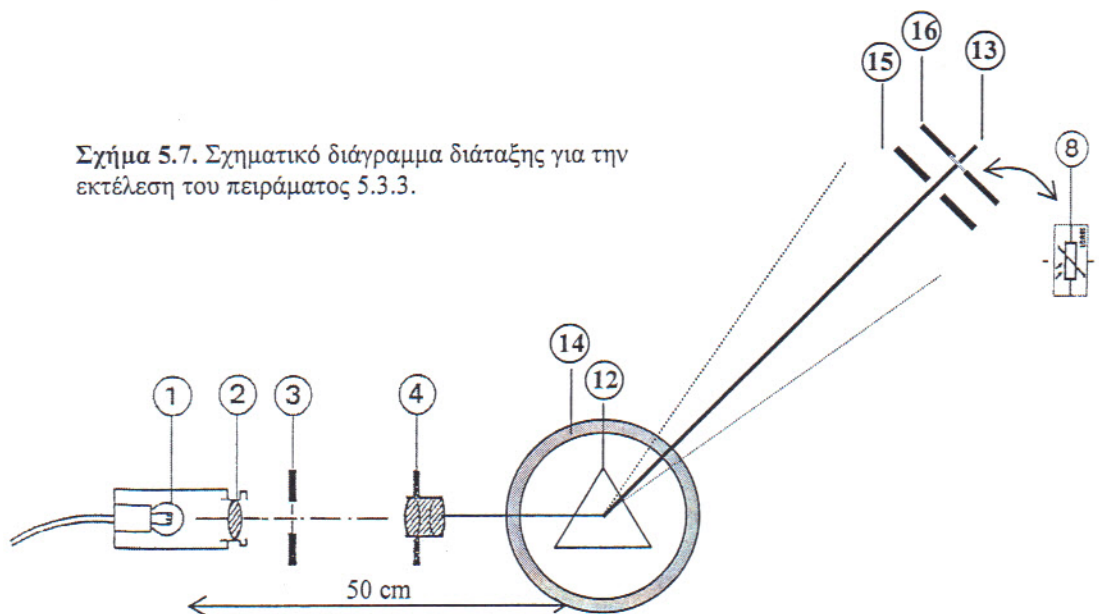


Σχήμα 5.6. Κύκλωμα ηλεκτρικών μετρήσεων

5.3.3. Διάταξη για την φασματική ανάλυση της φωτοαγωγιμότητας του CdS.

Για την εκτέλεση αυτού του σκέλους της άσκησης (βλ. Σχ. 5.7) χρειάζονται επιπλέον τα παρακάτω όργανα:

- 12) Πρίσμα για την ανάλυση της δέσμης.
- 13) Περιστρεφόμενος δρομέας .
- 14) Γωνιόμετρο με δείκτη για τον προσδιορισμό της γωνίας στρέψης του δρομέα.
- 15) Μεταβλητή σχισμή για την απομόνωση μικρού εύρους ζώνης μηκών κύματος ακτινοβολίας.
- 16) Φίλτρα ορατής ακτινοβολίας με κωδικούς 46832: Διέλευση 450 και 710 nm ή 46833: Διέλευση 400 και 700 nm.



Εκτός από όλα τα παραπάνω όργανα και στοιχεία, οι πειραματικές διατάξεις συνοδεύονται από μεταλλικό επίπεδο οδηγό πάνω στον οποίο τοποθετούνται βάσεις στήριξης των οπτικών στοιχείων και από ένα μαύρο κάλυμμα με σχισμή που καλύπτει τον αντιστάτη και περιορίζει την επίδραση της ακτινοβολίας περιβάλλοντος. Επιπλέον υπάρχουν καλώδια για τη συνδεσμολογία των ηλεκτρικών κυκλωμάτων.

Βιβλιογραφία

1. M.A. Omar, Elementary Solid State Physics, (Addison & Wiley, 1993), p. 254-304.
2. R.H. Bube, Electronic properties of Crystalline Solids, (Academic Press, 1974), p.166-210, p. 414-427, p. 449-460.
3. Laybold-Heraeus laboratory experiments catalogue no 7.2.3.1-2.
4. Κ. Καρούμπαλος, Γ. Φιλοκύπρου, Μαθήματα Ηλεκτρονικής, (Εκδόσεις Παν. Αθηνών, 1986) σ. 69-81.
5. R. Dalven, Introduction to applied solid state physics, (Plenum Press, N.York, 1980) p. 175-213.
6. R. H. Bube and L. A. Barton, RCA Rev. **20**, 564 (1959)

5.4. Εκτέλεση

5.4.1. Υπολογισμός του φωτορεύματος που διαρρέει φωτοαντιστάτη CdS ο οποίος τροφοδοτείτε με διαφορετικές τιμές τάσεις και διεγείρεται οπτικά με μεταβλητή ένταση ακτινοβολίας.

1. Συναρμολογήστε τη πειραματική διάταξη σύμφωνα με το Σχήμα 5.5.
2. Ρυθμίστε το εύρος της σχισμής 3 περίπου στα 0.5 mm και τους δύο πολωτές σε γωνία 0° και εστιάστε τη δέσμη πάνω στο φωτοαντιστάτη μετακινώντας το φακό 7.
3. Κλείστε τελείως τη σχισμή 3 και τοποθετήστε το προστατευτικό κάλυμμα στο φωτοαντιστάτη. Συνδέστε το ψηφιακό βολτόμετρο παράλληλα στο φωτοαντιστάτη και το ψηφιακό μιλιβολτόμετρο παράλληλα στην αντίσταση των $R=1\Omega$. Ρυθμίστε την τάση τροφοδοσίας περίπου στα 21 V.
4. Ανοίξτε τη σχισμή 3 μέχρι η τάση στην αντίσταση R να γίνει περίπου 9mV, δηλαδή η ένταση 9 mA. Από τη στιγμή αυτή και μετά δεν πρέπει να μεταβάλλετε το εύρος της σχισμής, ούτε να αυξήσετε την τάση των 21 V καθώς υπάρχει κίνδυνος να καταστρέψετε τον φωτοαντιστάτη.
5. Τοποθετήστε ένα φράγμα στη φωτεινή δέσμη και μετρήστε το φωτορεύμα υποβάθρου εξαιτίας της ακτινοβολίας υποβάθρου από τη φωτεινή πηγή 1 και εξωγενείς παράγοντες.
6. Εκτελέστε μετρήσεις του φωτορεύματος με γωνίες πολωτή-αναλύτη $\theta=0, 10^\circ, \dots, 90^\circ$ και καταχωρήστε τα αποτελέσματά σας στον Πίνακα I.
7. Επαναλάβετε τη σειρά μετρήσεων μειώνοντας τη τάση ανά 3 V.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.1

V (Volt)	$i_{\text{υποβ.}}$ (mA)	i (mA)									
		$\theta=0^\circ$	$\theta=10^\circ$	$\theta=20^\circ$	$\theta=30^\circ$	$\theta=40^\circ$	$\theta=50^\circ$	$\theta=60^\circ$	$\theta=70^\circ$	$\theta=80^\circ$	$\theta=90^\circ$
21											
18											
15											
12											
9											
6											
3											

5.4.2. Προσδιορισμός του φωτορεύματος που διαρρέει φωτοαντιστάτη CdS ο οποίος ακτινοβολείται με διαφορετικά μήκη κύματος.

Το σκέλος αυτό της άσκησης απαιτεί σημαντικές αλλαγές στη διάταξη και επομένως οφείλετε να διακόψετε τη τροφοδοσία του ηλεκτρικού κυκλώματος και να ακολουθήσετε τα ακόλουθα βήματα:

1. Συναρμολογήστε τη διάταξη σύμφωνα με το σχήμα 5.7
2. Εστιάστε το αναλυμένο φως από το πρίσμα 12 πάνω στον φωτοαντιστάτη μετακινώντας το φακό 7 και προσθέστε τη σχισμή με εύρος περίπου 0.2 mm.

3. Αντικαταστήστε το φωτοαντιστάτη με το φίλτρο διπλής διέλευσης 16. Σημειώστε τις δύο γωνίες που δείχνει το γωνιόμετρο 14 για τη μέγιστη διέλευση φωτός στο βαθύ ερυθρό φ_e και το βαθύ ιώδες φ_i . Ο έλεγχος γίνεται με άμεση οπτική αναγνώριση από τον παρατηρητή καθώς στρέφει το δρομέα 13.
4. Επανατοποθετήστε τον φωτοαντιστάτη στη θέση του φίλτρου και προσθέστε το προστατευτικό κάλυμμα. Τροφοδοτείστε το κύκλωμα με τάση περίπου 30 V.
5. Τοποθετήστε ένα φράγμα στη διέλευση του φωτός και μετρήστε το φωτορεύμα υποβάθρου $i^{υποβ} = \dots\dots\dots$
6. Μεταβάλλεται τη γωνία σκέδασης ανά 0.5° μεταξύ των δύο ακραίων τιμών φ_e και φ_i και καταγράψτε τα αποτελέσματα για το φωτορεύμα στον Πίνακα II.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.II

n	Γωνία σκέδασης θ_n (deg)	Φωτορεύμα i_n (mA)
1		
2		

5.5. Επεξεργασία των μετρήσεων

5.5.1. Υπολογισμός της χαρακτηριστικής καμπύλης φωτορεύματος – τάσης σε φωτοαντιστάτη CdS που διεγείρεται οπτικά με σταθερή ένταση ακτινοβολίας.

1. Με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 5.I σχεδιάστε τη χαρακτηριστική καμπύλη φωτορεύματος-τάσης για τις διαφορετικές τιμές της γωνίας θ . Ομαδοποιήστε τα αποτελέσματά σας σε 2-3 γραφικές παραστάσεις. Επεξηγήστε γιατί η εξάρτηση είναι γραμμική και προσδιορίστε γραφικά την αγωγιμότητα σ σε κάθε περίπτωση.

5.5.2. Υπολογισμός της εξάρτησης της αγωγιμότητας του CdS από την ένταση της διεγείρουσας ακτινοβολίας.

1. Από τις τιμές θ του Πίνακα 5.I, υπολογίστε τον παράγοντα $\cos^2\theta$, ο οποίος με βάση το νόμο του Malus είναι ανάλογος της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Αντιστοιχίστε τις τιμές αυτές με την αγωγιμότητα που προσδιορίσατε στο ερώτημα 5.5.1 και καταγράψτε τα αποτελέσματά σας στο παρακάτω Πίνακα III.

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.III

θ (deg)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\cos^2 \theta$										
σ (Ω^{-1})										

2. Σχεδιάστε την εξάρτηση της αγωγιμότητας του CdS από τον παράγοντα $\cos^2\theta$ και δικαιολογήστε τα αποτελέσματά σας.

5.5.3. Φασματική ανάλυση της φωτοαγωγιμότητας του CdS.

1. Σχολιάστε την εξάρτηση της φωτοαγωγιμότητας του CdS από την ενέργεια των φωτονίων διέγερσης, όπως δίνεται από τη βιβλιογραφία στο σχήμα 5.4 (β), σε σχέση με την αναμενόμενη γενική συμπεριφορά που περιγράφεται στο σχήμα 5.4 (α) και την εξάρτηση του συντελεστή απορρόφησης στο CdS όπως δίνεται στο Σχ. 5.3 (β). Εκτιμήστε το ενεργειακό χάσμα του υλικού σε θερμοκρασία δωματίου.

2. Βαθμονομείστε τα μήκη κύματος για τις ενδιάμεσες γωνίες από φ_e σε φ_μ θεωρώντας μια γραμμική εξάρτηση $\lambda(\text{nm}) = a \varphi(\text{deg}) + \beta$. Για το κάθε μήκος κύματος προσδιορίστε την αντίστοιχη ενέργεια των φωτονίων E_n . Καταχωρήστε τις τιμές λ_n , E_n και τα αποτελέσματα για το καθαρό φωτορεύμα $i_n^k = i_n - i_n^{\text{υποβ}}$ στον παρακάτω πίνακα. 5.IV.

3. Η πηγή που διαθέτετε δεν ακτινοβολεί με την ίδια ένταση για όλα τα μήκη κύματος αλλά ακολουθεί τον νόμο του Planck ($F(\lambda, T) = 2\pi hc^2 / [\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)]$), βλ. Άσκηση 16 – Τόμος 2 – Εργαστηριακές ασκήσεις Φυσικής κ' Άσκηση Φασματική κατανομή μέλανος σώματος – Εργαστηριακές Ασκήσεις Ατομικής Φυσικής) για την ακτινοβολία μέλανος σώματος σε θερμοκρασία $4.13 \cdot 10^3 \text{ K}$. Με βάση τον νόμο αυτό υπολογίστε τη συνάρτηση της φασματικής κατανομής της έντασης της ακτινοβολίας F για όλα τα μήκη κύματος που υπολογίσατε προηγουμένως. Στη συνέχεια κανονικοποιήστε τις τιμές του καθαρού φωτορεύματος ως προς την ίδια ένταση ακτινοβολίας (τιμές i'_n στον Πίνακα 5. IV) αποδεχόμενοι τη γραμμική εξάρτηση του φωτορεύματος από την ένταση της ακτινοβολίας σύμφωνα με την εξ. (5.13). (Υπόδειξη: Η κανονικοποίηση μπορεί να γίνει με βάση την τιμή του φωτορεύματος με την μέγιστη ένταση ακτινοβολίας F_{max} . Οι κανονικοποιημένες τιμές i_n προκύπτουν από τις επιμέρους τιμές του καθαρού φωτορεύματος i_n^k διαιρώντας με τον αντίστοιχο παράγοντα της σχετικής έντασης F_n / F_{max} .)

ΠΙΝΑΚΑΣ 5.IV

n	Καθ. φωτορεύμα i_n^k (mA)	Μήκος κύματος λ_n (nm)	$F_n(\lambda, T)$ (W/m ³)	E_n (eV)	Κανον. Φωτορεύμα i'_n (mA)
1					
2					

4. Σχεδιάστε το κανονικοποιημένο φωτορεύμα i' συναρτήσει της ενέργειας των φωτονίων E_n και συγκρίνετε με τα αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία όπως αναπαράγονται στο Σχ. 5.4 (β). Σημειώστε τις ομοιότητες και τις διαφορές και προσπαθήστε να τις δικαιολογήσετε.