

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σ.Ε.Μ.Φ.Ε.

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

Θωμόπουλος Σπύρος
spyros.thomop@gmail.com/ ge19042@mail.ntua.gr

Ημερομηνία Παράδοσης 23/05/2022

Σκοπός

Ο στόχος της εν λόγω εργαστηριακής άσκησης είναι ο υπολογισμός της καμπύλης ρεύματος-τάσης, της φωτοαγωγιμότητας και την εξάρτησή της από την ένταση και την συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, για έναν φωτοαντιστάτη από CdS. Η διέγερση του CdS θα πραγματοποιηθεί μέσω HM ακτινοβολίας στο ορατό.

Θεωρητικά Στοιχεία

Η φωτοαγωγιμότητα πρόκειται για το φαινόμενο κατά το οποίο αυξάνεται η αγωγιμότητα ενός ημιαγωγικού υλικού κατά την απορρόφηση HM ακτινοβολίας. Σε έναν ημιαγωγό το ενεργειακό χάσμα μεταξύ της Ζώνης Σθένους(ZS) και της Ζώνης Αγωγιμότητας(ZA) είναι $< 4\text{eV}$, έτσι όταν προσπέσει σε αυτόν ακτινοβολία μεγαλύτερης ή ίσης ενέργειας, διεγείρει τα ηλεκτρόνια από την ZS στην ZA και εμφανίζονται κενά ηλεκτρονίων, δηλαδή "θετικά" φορτισμένες οπές στην ZS. Εξ' αιτίας της διατήρησης της ορμής επιβάλλει μόνο τις διεγέρσεις μεταξύ ίδιων κυματανυσμάτων \vec{k} .

Καθώς αυξάνεται η ενέργεια της προσπίπτουσας HM ακτινοβολίας, τα ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν ολοένα υψηλότερες ενεργειακά στάθμες της ZA, επομένως θα αυξάνεται και συντελεστής απορρόφησης

$$\alpha = L(h\nu - E_g)^{1/2}, \quad \text{L:σταθερά, } h\nu \geq E_g \quad (1)$$

Γενικότερα, θα έχουμε κίνηση τόσο των ηλεκτρονίων όσο και των οπών και σε αυτή την κίνηση οφείλεται η αγωγιμότητα του ημιαγωγού. Συγκεκριμένα, αν n και p οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και των οπών αντίστοιχα, μ_e, μ_h , η ευκινησία τους, δηλαδή το πόσο γρήγορα μπορούν να κινηθούν εντός του ημιαγωγού όταν εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο, τότε θα είναι

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_p = ne\mu_e + p e\mu_h = ne(\mu_e + \mu_p) \quad (2)$$

Διεγέρσεις ηλεκτρονίων μπορούμε να έχουμε με δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι θερμικά, με ρυθμό μετάβασης g_0 και ο δεύτερος, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι μέσω ακτινοβολίας με ρυθμό g και κάθεμία από αυτές συνεισφέρει στην αγωγιμότητα, ενώ αντίστοιχα έχουμε και επανασυνδέσεις ηλεκτρονίων-οπών. Αν λάβουμε υπόψιν μας και τον χρόνο τ_n που απαιτείται για να επέλθει η ισορροπία, τότε προκύπτει το ότι η φωτοαγωγιμότητα είναι

$$\sigma_{ph} = \frac{\alpha(\omega)I(\omega)e\tau_n(\mu_e + \mu_h)}{\hbar\omega} \quad (3)$$

Από την σχέση (1) έχουμε ότι η προσπίπτουσα ακτινοβολία πρέπει να ικανοποιεί την συνθήκη $E_{in} = h\nu \geq E_g$, δηλαδή η ενέργειά της να είναι μεγαλύτερη ή ίση από το ενεργειακό κενό προκειμένου να έχουμε την απορρόφησή της από τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους, άρα φωτοαγωγιμότητα. Όμως, όταν η ενέργεια είναι πολύ μεγαλύτερη από το ενεργειακό κενό E_g , τότε θα έχουμε το ότι ο συντελεστής απορρόφησης γίνεται πολύ μεγάλος και η ακτινοβολία απορροφάται στην επιφάνειά του. Εκεί υπάρχουν ατέλειες που συνεισφέρουν στην επανένωση ηλεκτρονίων-οπών, άρα την μείωση του τ_n , άρα την μείωση της φωτοαγωγιμότητας αφού είναι ανάλογη του τ_n .

Γενικά θα έχουμε τρεις περιοχές διαφορετικής συμπεριφοράς της φωτοαγωγιμότητας ανάλογα με το μήκος κύματος.

- . *Περιοχή I* : Έχουμε μικρό μήκος κύματος και κυριαρχούν τα παραπάνω φαινόμενα στην επιφάνεια, δηλαδή μικρή φωτοαγωγιμότητα
- . *Περιοχή II* : Πρόκειται για την μεσαία περιοχή όπου η παρουσιάζεται το μέγιστο της φωτοαγωγιμότητας
- . *Περιοχή III*: Έχουμε μεγάλα μήκη κύματος και ασθενή απορρόφηση, άρα μικρή φωτοαγωγιμότητα

Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διαδικασία, άρα και η διάταξη χωρίζεται σε δύο μέρη.

A Μέρος

Εδώ, η διάταξη αποτελείται από:

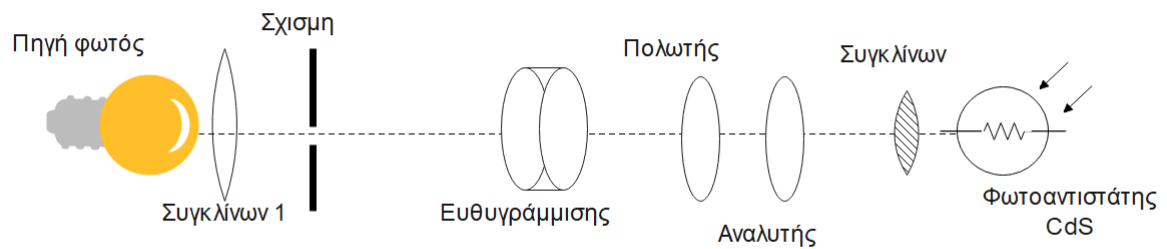
- . Πηγή λευκού φωτός

- . Συγκλίνων φακός
- . Σχισμή για τον περιορισμό του φωτός από την πηγή
- . Φακός ευθυγράμμισης
- . Πολωτής
- . Αναλυτής
- . Συγκλίνων φακός με $f = 15\text{cm}$
- . Φωτοαντιστάτης από CdS
- . Ηλεκτρικό κύκλωμα στο οποίο συνδέεται ο φωτοαντιστάτης CdS το οποίο αποτελείται επιπλέον από μία πηγή συνεχούς, μία αντίσταση 1Ω συνδεδεμένη παράλληλα με τον φωτοαντιστάτη, ένα αμπερόμετρο και ένα βολτόμετρο

Με τον πολωτή και τον αναλυτή μπορούμε να ελέγξουμε την ένταση της τελικής δέσμης που θα καταλήξει στο CdS χρησιμοποιώντας τον ν. Malus

$$I = I_0 \cos^2 \theta \quad (4)$$

Η διάταξη φαίνεται στην Εικόνα (1)



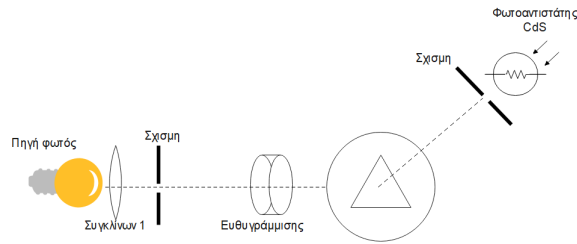
Εικόνα. 1: Διάταξη Α Μέρους

Β' Μέρος

Η διάταξη του Β Μέρους αποτελείται από

- . Πηγή λευκού φωτός
- . Συγκλίνων φακός
- . Σχισμή για τον περιορισμό του φωτός από την πηγή
- . Φακός ευθυγράμμισης
- . Πρίσμα για να αναλύσουμε την δέσμη του φωτός
- . Περιστρεφόμενος δρομέας για να τοποθετηθεί το πρίσμα
- . Γωνιόμετρο
- . Σχισμή για την απομόνωση μικρού εύρους μηκών κύματος

Η διάταξη φαίνεται στην Εικόνα (2)



Εικόνα. 2: Πειραματική Διάταξη Β Μέρους

Πειραματική Διαδικασία - Επεξεργασία Μετρήσεων

Α Μέρος: Καμπύλη Φωτορεύματος-Τάσης

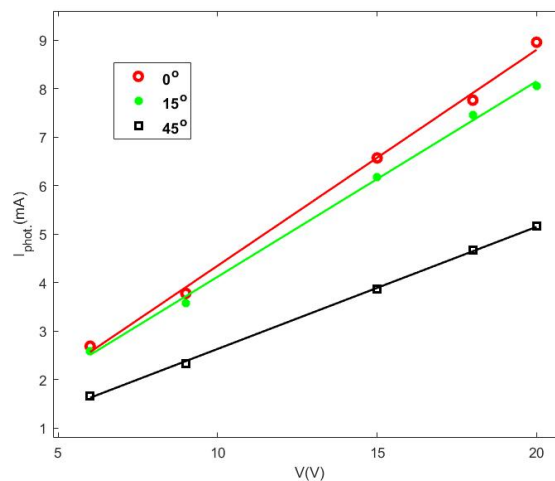
Αφού συναρμολογήσουμε την διάταξη της Εικόνας (1), παίρνουμε σταθερές θέσεις έτσι ώστε να μην επηρεάζεται η ένδειξη για το φωτορεύμα με την μεταβολή της φωτεινότητας του τριγύρω χώρου ανάλογα με τις αλλαγές στην θέση μας. Τώρα, για κάθε τιμή της τάσης στα άκρα του CdS $V = \{20, 15, 9, 3\}V$ και για γωνίες του πολωτή $\theta = \{0, 20, 50, 70, 90\}^\circ$ μετράμε το ρεύμα που προκύπτει από την φωτοαγωγιμότητα του CdS. Σε κάθε αλλαγή της τάσης μετράμε και το ρεύμα που προκύπτει από το υπόβαθρο, προκειμένου να το αφαιρέσουμε από την τιμή που μετρήσαμε με την πηγή φωτός ανοιχτή. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα (1)

V(V)	$I_{back}(mA)$	$I(0)(mA)$	$I(15)mA$	$I(45)m(A)$
20	0.040	9.00	8.10	5.20
18	0.035	7.80	7.50	4.70
15	0.027	6.60	6.20	3.90
9	0.020	3.80	3.60	2.35
6	0.011	2.70	2.60	1.68

V(V)	$I_{true}(0)(mA)$	$I_{true}(15)(mA)$	$I_{true}(45)(mA)$
20	8.96	8.06	5.16
18	7.76	7.465	4.665
15	6.573	6.173	3.873
9	3.78	3.58	2.33
6	2.689	2.589	1.669

Πίνακας. 1

Οι γραφικές παραστάσεις Φωτορεύματος-Τάσης για τις διαφορετικές τιμές της γωνίας θ του αναλυτή φαίνονται στην Εικόνα (3) και έχουν προκύψει από την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων.



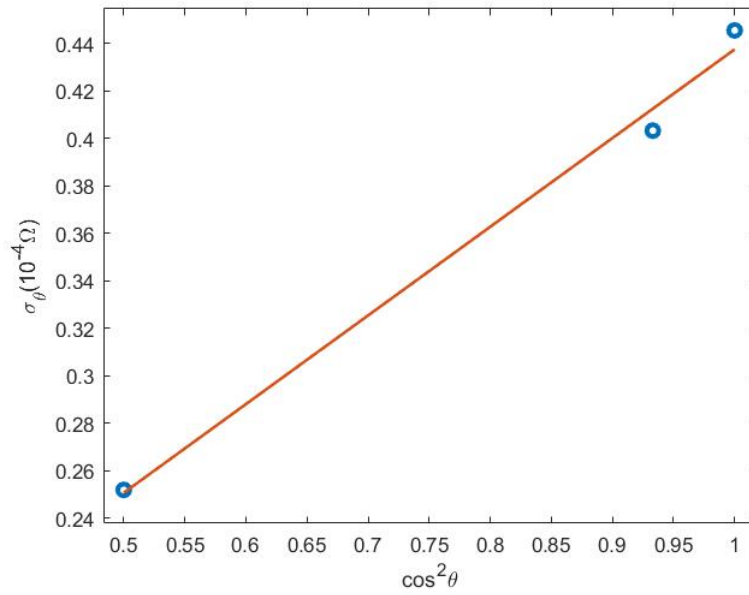
Εικόνα. 3

Η κλίση κάθε ευθείας που προκύπτει από την μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων αντιστοιχεί στην εκάστοτε τιμή της αγωγιμότητας σ . Όλες οι τιμές φαίνονται στον Πίνακα (2)

θ	$\sigma_\theta(10^{-4}\Omega)$	$\cos^2\theta$
0	0.45	1.000
15	0.40	0.933
45	0.25	0.500

Πίνακας. 2: Αγωγιμότητα συναρτήσει της θ .

Η γραφική παράσταση $\cos^2\theta - \sigma_\theta$ φαίνεται στην Εικόνα (4) όπου παρατηρούμε ότι η αγωγιμότητα εξαρτάται γραμμικά από το $\cos^2\theta$ που σημαίνει ότι από τον ν.Malus (4) θα εξαρτάται γραμμικά και από την ένταση του εισερχόμενου φωτός.



Εικόνα. 4: $\cos^2\theta - \sigma_\theta$

Η γραμμικότητα είναι εμφανής από την παραπάνω γραφική παράσταση και με την επιβεβαίωσή της, επιβεβαιώνουμε πως φωτοαγωγιμότητα και ένταση προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι ευθέως ανάλογες

B' Μέρος

Στο Μέρος Β, θα μελετήσουμε την εξάρτηση του φωτορεύματος από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Τροφοδοτούμε το κύκλωμα του φωτοαντιστάτη με $V = 30V$ και παρατηρούμε το φάσμα της λάμπας που έχει αναλυθεί από το πρίσμα. Τώρα μετράμε τις γωνίες στις οποίες βρίσκεται το ερυθρό και το ιώδες του φάσματος, οι οποίες αντιστοιχά είναι $\phi_e = 140^\circ$ και $\phi_i = 144^\circ$. Τώρα μεταβάλλουμε την γωνία κατά 0.5° από ϕ_e έως ϕ_i και μετράμε το αντίστοιχο φωτόρευμα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα (3).

Θεωρώντας γραμμική την σχέση γωνίας-μήκους κύματος, δηλαδή $\lambda(nm) = \alpha_0\phi + \beta_0$ και γνωρίζοντας τις γωνίες που αντιστοιχούν στα δύο άκρα του ορατού που είναι $\lambda_e = 700nm$ και $\lambda_i = 400nm$, μπορούμε να βρούμε τις σταθερές, οι οποίες προκύπτουν: $\alpha_0 = -75[nm]$, $\beta_0 = 11200[nm]$, άρα

$$\lambda[nm] = -75\phi[^\circ] + 11200 \quad (5)$$

Κατ' επέκταση, από την σχέση $E = hc/\lambda$ μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί σε κάθε γωνία. Επίσης, η πηγή ακτινοβολεί διαφορετική ένταση για κάθε μήκος κύματος σύμφωνα με τον ν.Planck:

$$F(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (exp(hc/\lambda kT) - 1)} \quad (6)$$

$\theta_n(^{\circ})$	$I_0(\mu A)$	$I_{back}(\mu A)$
144.0	1.10	0.70
143.5	1.22	0.85
143.0	1.41	0.93
142.5	1.65	0.96
142.0	2.11	0.98
141.5	2.36	1.10
141.0	3.11	1.10
140.5	2.39	1.11
140.0	2.10	1.13

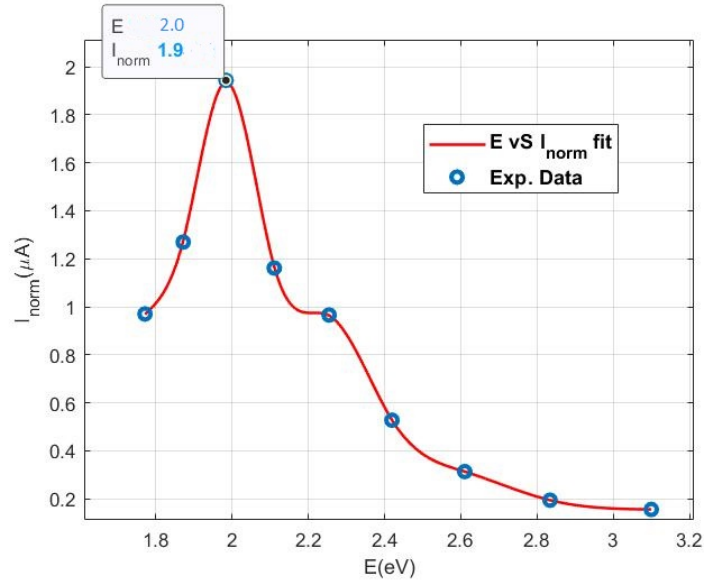
Πίνακας. 3

Τώρα, θα πρέπει να κανονικοποιήσουμε την τιμή του καθαρού φωτορεύματος με έναν συντελεστή $\alpha_{norm} = F/F_{max}$. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα (4):

$\theta(^{\circ})$	$I_{\kappa\alpha\theta}(\mu A)$	$\lambda(nm)$	$F_n(\lambda, T)(10^{13}W/m^3)$	$E(eV)$	α_{norm}	$I'_{\chi\alpha\nu\sigma\nu.}(mA)$
144.0	0.40	400.0	0.602	3.10	0.389	0.16
143.5	0.37	437.5	0.811	2.83	0.525	0.19
143.0	0.48	475.0	1.009	2.61	0.653	0.31
142.5	0.69	512.5	1.181	2.42	0.765	0.53
142.0	1.13	550.0	1.320	2.25	0.855	0.97
141.5	1.23	587.5	1.424	2.11	0.922	1.16
141.0	2.01	625.0	1.493	1.98	0.967	1.94
140.5	1.28	662.5	1.532	1.87	0.991	1.27
140.0	0.97	700.0	1.545	1.77	1.000	0.97

Πίνακας. 4: Όπου $T = 4.13 \times 10^3 K$

Από τον Πίνακα (4) παίρνω την παρακάτω γραφική $E-I_{norm}$:



Εικόνα. 5

Φαίνεται πως η καμπύλη είναι αντίστοιχη με την θεωρητική, δηλαδή ότι παρουσιάζει ένα μέγιστο φωτόρευμα και οι υπόλοιπες τιμές είναι μικρότερες. Το ζήτημα είναι πως ενώ περιμέναμε να παρουσιάζεται στα 2.4eV, εδώ φαίνεται ότι προκύπτει στα 2.0eV, δηλαδή έχουμε σφάλαμα της τάξης του $\sim 17\%$, το οποίο είναι πολύ μεγάλο.

Συμπεράσματα

Τα σφάλματα εν γένει ήταν μεγάλα και αισθητά και στα δύο μέρη της διαδικασίας. Ενδεχομένως να οφείλονται στην πολυκαιρία των οργάνων αλλά επίσης και στο γεγονός ότι δεν είχαμε πλήρη συσχότιση με αποτέλεσμα η παραμικρή μετατόπισή μας εντός του χώρου να επιφέρει διαφορετική τιμή στις μετρήσεις.