

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Περιγραφή της συσκευής – Φύλλο εργασίας

Συσκευή ΡΕΑ01 από τις "ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΙΣ".

Στο βαλιτσάκι περιέχονται τα εξής:

- Η συσκευή του Φωτοηλεκτρικού φαινομένου
- Τροφοδοτικό 15V DC
- Πολύμετρο RE65
- Σετ πέντε φίλτρων
- Πλαστικό κάλυμμα προστασίας του φωτοκύτταρου

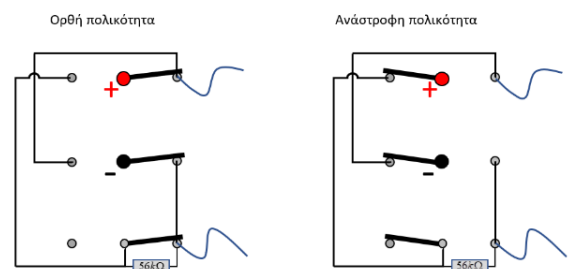
Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων απαιτείται και ένα ακόμα πολύμετρο για τη μέτρηση της τάσης ανόδου – καθόδου



Η φωτογραφία της διάταξης

Στην επιφάνεια της βάσης της συσκευής είναι τυπωμένο το κύκλωμα. Απεικονίζονται τα αδρά χαρακτηριστικά του κυκλώματος και όχι οι λεπτομέρειες με αποτέλεσμα να μην είναι ξεκάθαρος ο τρόπος λειτουργίας. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται το κύκλωμα της συσκευής με όλες τις λεπτομέρειες.

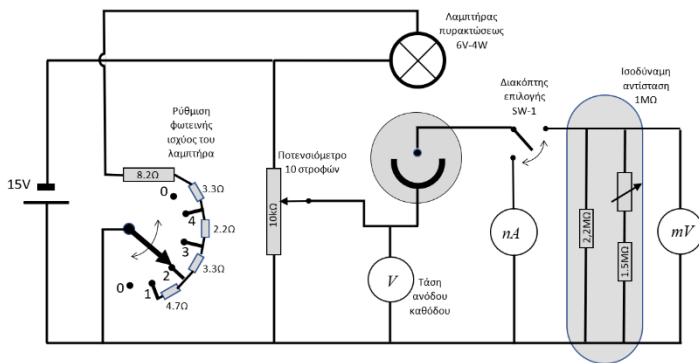
Μέσω ενός 9-pin διακόπτη δύο θέσεων μπορούμε να επιλέξουμε την πολικότητα της τάσης στο φωτοκύτταρο ώστε να επιταχύνουμε ή να επιβραδύνουμε τα φωτοηλεκτρόνια που εξέρχονται από το μέταλλο της καθόδου.



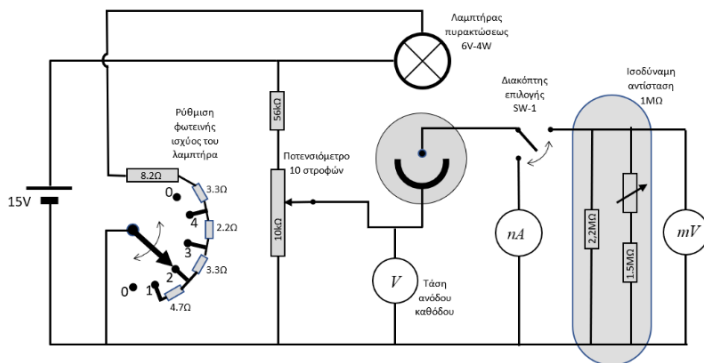
Οι δύο καταστάσεις του διακόπτη

Οι δύο αυτές καταστάσεις απεικονίζονται σε ξεχωριστά σχήματα για καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του κυκλώματος.

Ορθή πολικότητα (επιτάχυνση των φωτοηλεκτρονίων)



Ανάστροφη πολικότητα (επιβράδυνση φωτοηλεκτρονίων)

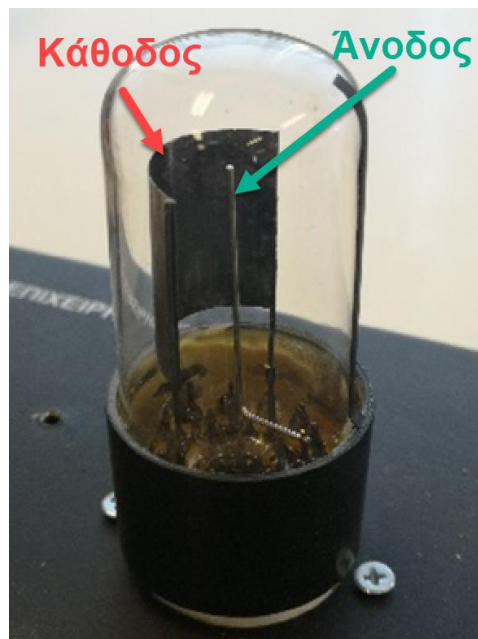


Η μέτρηση του φωτορεύματος μπορεί να γίνει άμεσα ή έμμεσα επιλέγοντας κατάλληλα από τον μεταγωγό διακόπτη SW1. Επειδή η ένταση του φωτορεύματος που χρειάζεται να μετρηθεί, ειδικά όταν προσδιορίζουμε την τάση αποκοπής, παίρνει πολύ μικρές τιμές (της τάξης του nA) και συνήθως δεν υπάρχουν στα σχολικά εργαστήρια νανοαμπερόμετρα, είναι μάλλον μονόδρομος η έμμεση μέτρηση του φωτορεύματος μέσω της πτώσης τάσης που προκαλείται σε μια αντίσταση 1MΩ στα άκρα της οποίας συνδέουμε το πολύμετρο που συνοδεύει τη συσκευή. Αυτό σημαίνει ότι η ένδειξη σε mV του πολυμέτρου αντιστοιχεί σε nA του ρεύματος του φωτοκυττάρου. Στην κλίμακα των 200mV η ακρίβεια του πολυμέτρου είναι 0,01mV που σημαίνει ότι η ακρίβεια μέτρησης του φωτορεύματος είναι 10pA ενώ στην κλίμακα των 2V η ελάχιστη ένδειξη είναι 0,1mV και η ακρίβεια μέτρησης 0,1nA.

Η πηγή φωτός της διάταξης είναι ένας λαμπτήρας πυρακτώσεως 6V-4W η φωτοβολία

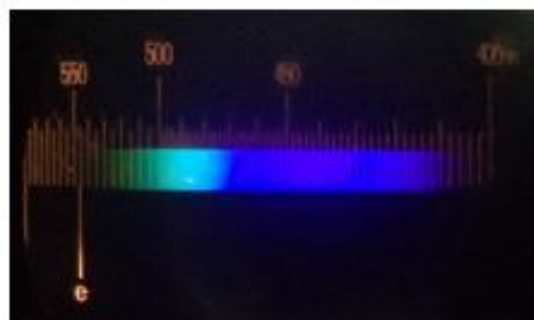
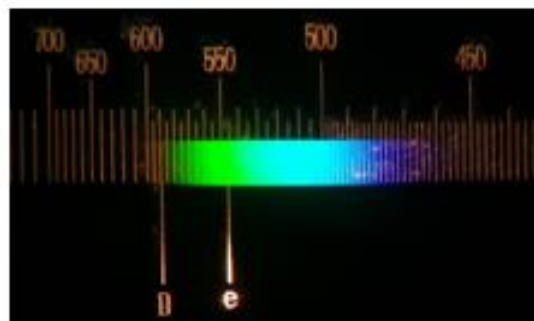
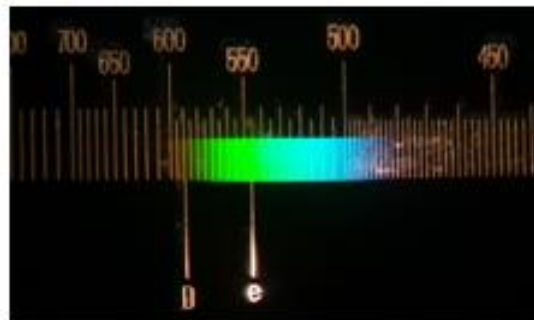
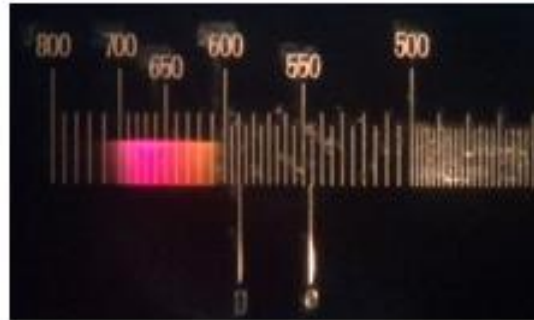
του οποίου μπορεί να μεταβάλλεται διαβαθμισμένα μέσω διακόπτη τεσσάρων θέσεων.

Η λυχνία βρίσκεται σε μεταλλικό κάλυμμα για την απομόνωσή της από τον διάχυτο φωτισμό και για την προστασία της. Το κάλυμμα φέρει μικρή τρύπα απέναντι ακριβώς από τον λαμπτήρα φωτισμού και στην ίδια πλευρά θήκη τοποθέτησης των φίλτρων απορρόφησης.



Τα φίλτρα

Διατίθενται πέντε φίλτρα που το καθένα επιτρέπει τη διέλευση φωτός σε κάποιο συγκεκριμένο «παραθύρο» μηκών κύματος, και απορροφά τα υπόλοιπα.



Στις εικόνες αριστερά φαίνονται οι φωτογραφίες των φίλτρων καθώς και φωτογραφίες από το φασματοσκόπιο.

Στο φασματοσκόπιο αναλύθηκε το φάσμα λευκού φωτός ενός λαμπτήρα αφού παρεμβλήθηκε το αντίστοιχο φίλτρο. Φαίνεται έτσι το τμήμα του φάσματος τη διέλευση του οποίου επιτρέπει το κάθε φίλτρο. Παρατηρήθηκε μια μικρή μεταβολή στο εύρος του παραθύρου διέλευσης, με την αλλαγή της έντασης της ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα η αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας επιφέρει μικρή διεύρυνση στα όρια του διερχόμενου φάσματος. Αυτό βέβαια δικαιολογείται αν λάβουμε υπόψη την αλλαγή της φασματικής κατανομής με την ένταση της φωτοβολίας του λαμπτήρα.

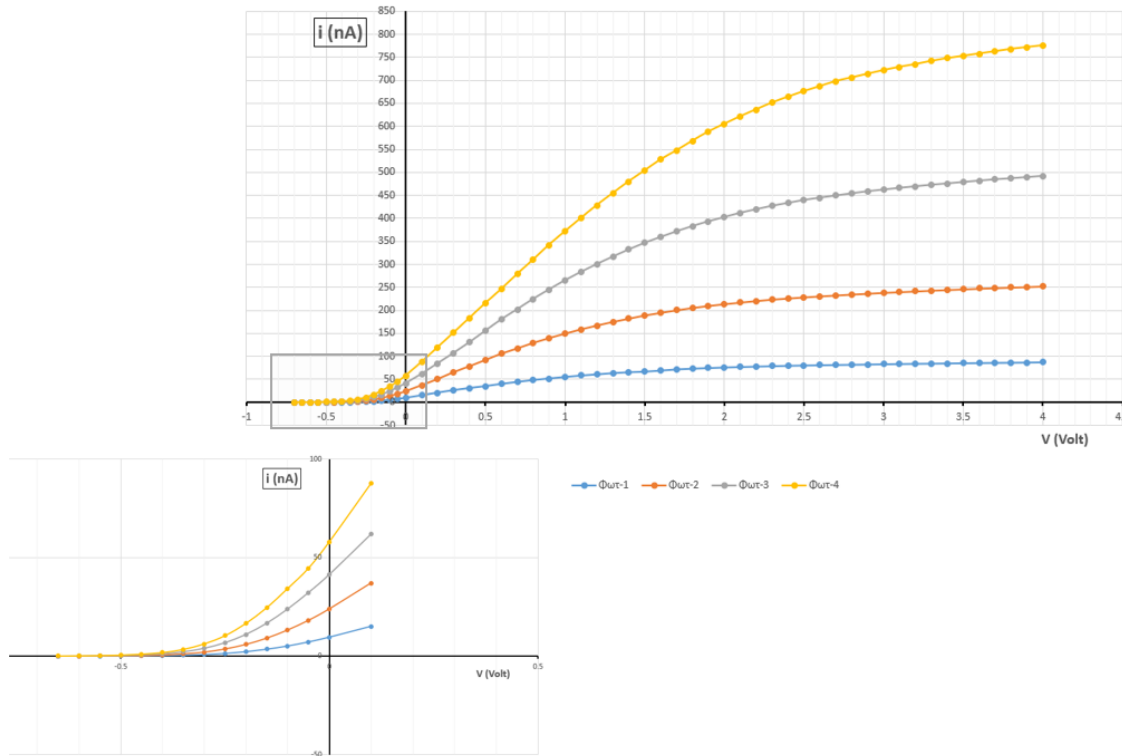
Για το πείραμα του υπολογισμού της σταθεράς του Planck η τιμή του μήκους κύματος που μας ενδιαφέρει είναι η ελάχιστη, η οποία αντιστοιχεί στην μέγιστη συχνότητα και τη μέγιστη ενέργεια φωτονίων στην οποία αντιστοιχεί η τάση αποκοπής που θα μετράμε για κάθε φίλτρο.

Δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν

1. Χαρακτηριστική καμπύλη του φωτοκυττάρου.

Χρησιμοποιώντας το φίλτρο Νο3 λήφθηκαν μετρήσεις της έντασης του φωτορεύματος σαν συνάρτηση της τάσης ανόδου – καθόδου, για τις τέσσερις δυνατές τιμές της έντασης του φωτός. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.

Χαρακτηριστική καμπύλη της φωτολυχνίας για διάφορες τιμές την φωτεινότητας του λαμπτήρα

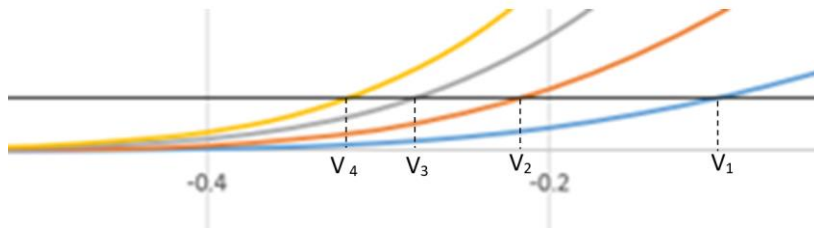


Στην περιοχή τιμών της τάσης ανόδου – καθόδου μέχρι περίπου 4V η μορφή των χαρακτηριστικών καμπυλών είναι η αναμενόμενη καθώς,

- Φαίνεται να οδηγούμαστε σε ρεύμα κόρου που εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας όπως προβλέπεται από τη θεωρία.
- Η τάση αποκοπής όπως φαίνεται από τις μετρήσεις παρουσιάζει μια μικρή διαφοροποίηση (αύξηση) με την αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας. Η μικρή αυτή διαφορά ενδέχεται να οφείλεται στην διεύρυνση και τροποποίηση του φάσματος της διερχόμενης ακτινοβολίας, στην περιορισμένη ακρίβεια των οργάνων μέτρησης κ.α.

Μια ερμηνεία για μια από τις αιτίες της παρατηρούμενης αύξησης της τάσης αποκοπής με την αύξηση της έντασης που οφείλεται στην πεπερασμένη ακρίβεια των οργάνων μέτρησης μπορεί να είναι η εξής:

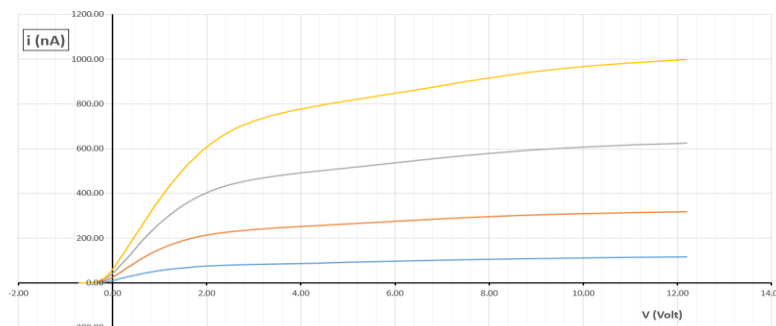
Για μια οποιαδήποτε τιμή της ανάστροφης τάσης η ένταση του φωτορεύματος είναι αύξουσα συνάρτηση της έντασης της ακτινοβολίας όπως εύκολα διαπιστώνουμε από το διάγραμμα. Ας υποθέσουμε η ένδειξη του πολυμέτρου που μετρά το φωτόρευμα μηδενίζεται για ένταση ρεύματος μικρότερη από μια μέγιστη τιμή (μαύρη γραμμή, παράλληλη στον άξονα της τάσης). Η τιμή αυτή εξαρτάται από την ακρίβεια μέτρησης του οργάνου. Αυτό θα συμβεί για διαφορετικές τιμές της ανάστροφης τάσης που εξαρτώνται από την ένταση της ακτινοβολίας. Οι τιμές αυτές (V_1, V_2, V_3, V_4) θα καταγραφούν ως τάσεις αποκοπής με υποεκτίμηση που θα εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας. Επομένως η αύξηση της έντασης της ακτινοβολίας προκαλεί και αύξηση της μετρούμενης τάσης αποκοπής όπως παρατηρούμε.



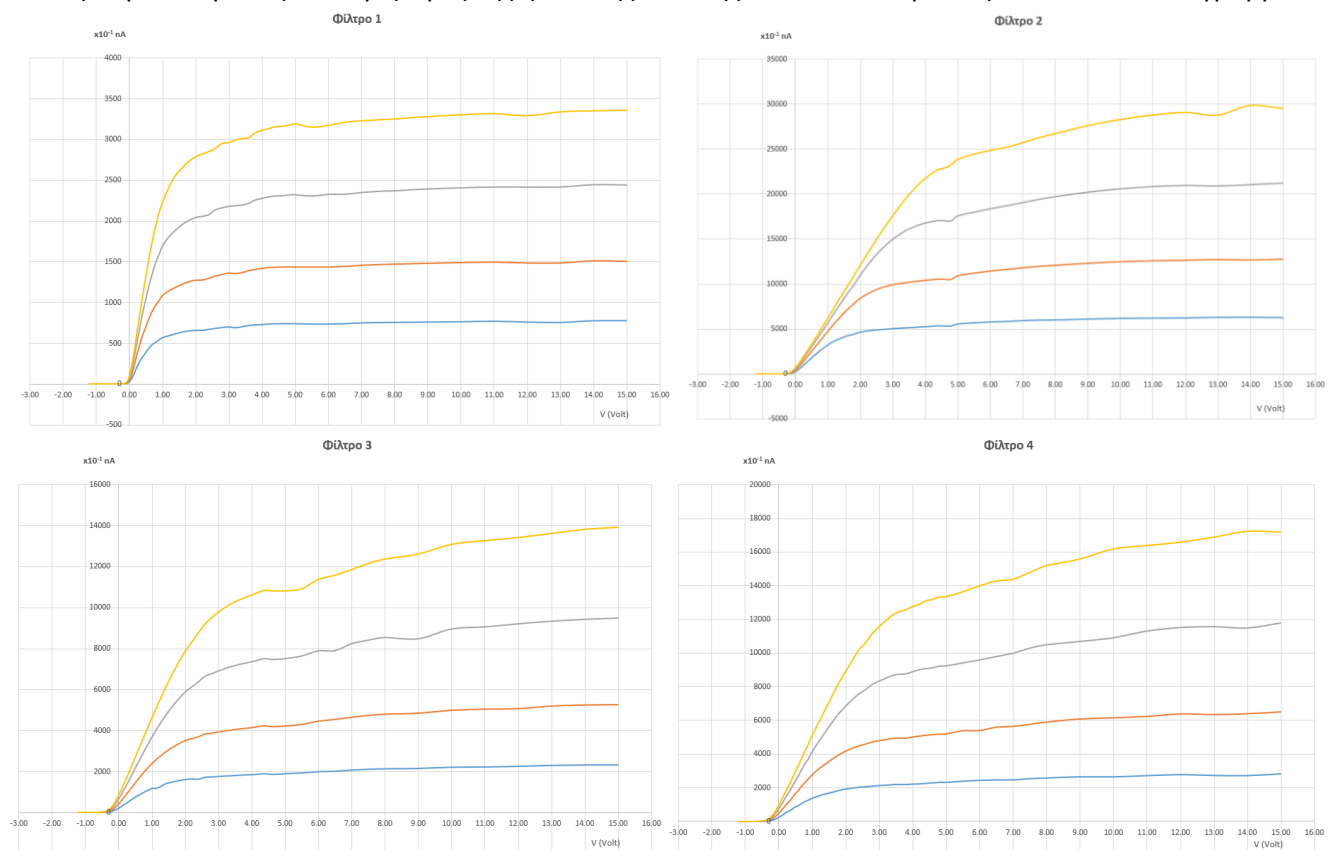
Για μεγαλύτερες τιμές της τάσης ανόδου – καθόδου τα πειραματικά αποτελέσματα αποκλίνουν από τα αναμενόμενα ειδικά για μεγάλες τιμές της φωτεινότητας του λαμπτήρα όπως φαίνεται από τη μορφή των χαρακτηριστικών. Συγκεκριμένα παρατηρούμε ότι πλησιάζοντας στον κορεσμό και για τάση ανόδου – καθόδου περίπου 4 – 5 V , εμφανίζεται ένα «σκαλοπάτι» στην ένταση του φωτορεύματος, η οποία αυξάνεται συνεχώς.

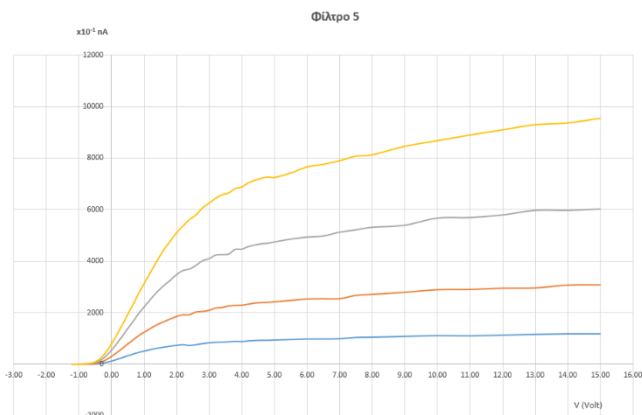
Οι παραπάνω μετρήσεις έγιναν με τροφοδοσία της συσκευής από διαφορετικό αυτοσχέδιο τροφοδοτικό καλύτερης σταθεροποίησης, παρακάμπτοντας το τροφοδοτικό της διάταξης.

Χαρακτηριστική καμπύλη της φωτολυχνίας για διάφορες τιμές την φωτεινότητας του λαμπτήρα



Με το τροφοδοτικό της διάταξης έγιναν μετρήσεις και δημιουργήθηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες για κάθε φίλτρο και για τις τέσσερις τιμές της φωτεινής έντασης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα διαγράμματα.





Είναι φανερό ότι εκτός από την περίπτωση με το φίλτρο Νο 1 στις υπόλοιπες περιπτώσεις η εξάρτηση της έντασης του ρεύματος από την τάση δεν είναι η αναμενόμενη κυρίως στην υψηλή φωτεινότητα.

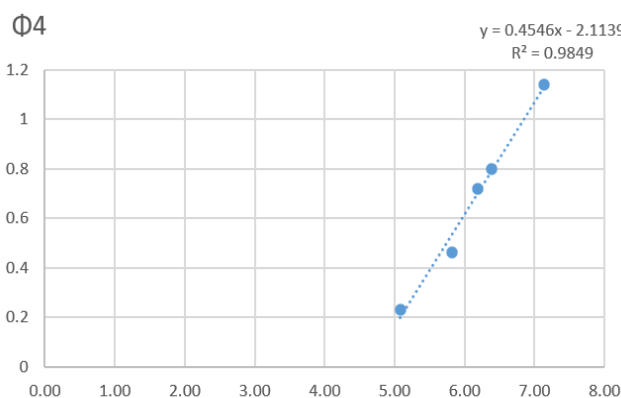
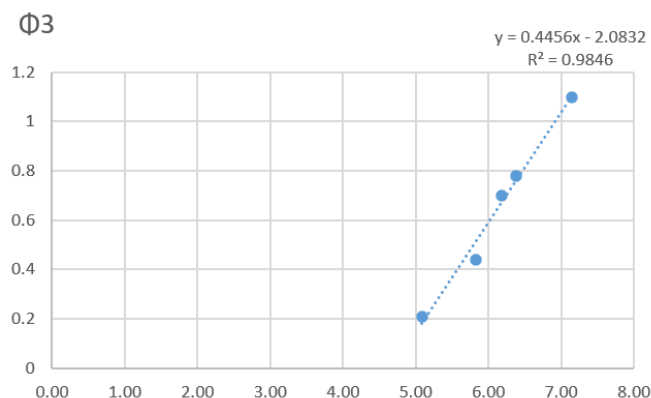
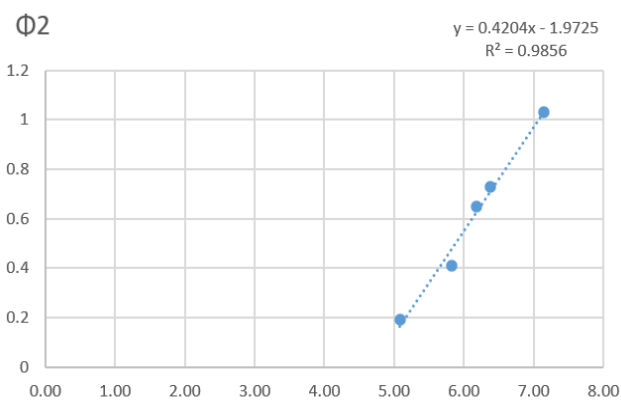
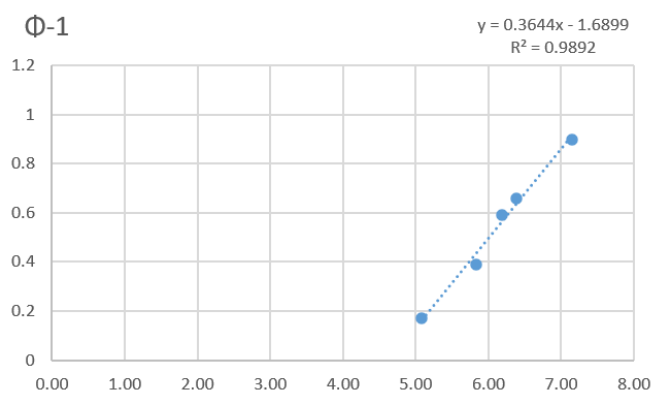
Αξιοσημείωτο είναι ότι για κάποια περιοχή τιμών της τάσης ανόδου – καθόδου (περίπου 3 – 5 Volt), το φωτόρευμα παρουσίαζε μια έντονη αστάθεια με αποτέλεσμα οι μετρήσεις να έχουν μεγάλο σφάλμα κάτι το οποίο φαίνεται και στα διαγράμματα.

Ο τρόπος μεταβολής της έντασης του φωτός μέσω της αλλαγής της έντασης του ρεύματος στο λαμπτήρα έχει το μειονέκτημα ότι δεν αλλάζει μόνο η ένταση αλλά και το φάσμα της ακτινοβολίας λόγω αλλαγής της θερμοκρασία του νήματος του λαμπτήρα.

2. Υπολογισμός της σταθεράς του Planck

Για κάθε μία τις τέσσερις διαφορετικές τιμές της φωτεινότητας του λαμπτήρα και ανάστροφη πόλωση ανόδου – καθόδου μετρήθηκε η τάση αποκοπής για κάθε ένα από τα πέντε φίλτρα. Οι μετρήσεις φαίνονται στον παρακάτω πίνακα,

ΦΙΛΤΡΟ Νο	λ_{\min} (nm)	f ($\times 10^{14}$ Hz)	Φωτοβολία 1	Φωτοβολία 2	Φωτοβολία 3	Φωτοβολία 4
			$V_{\text{απ}}$ (v)	$V_{\text{απ}}$ (v)	$V_{\text{απ}}$ (v)	$V_{\text{απ}}$ (v)
1	590	5.08	0.17	0.19	0.21	0.23
2	515	5.83	0.39	0.41	0.44	0.46
3	485	6.19	0.59	0.65	0.70	0.72
4	470	6.38	0.66	0.73	0.78	0.80
5	420	7.14	0.90	1.03	1.10	1.14



Με βάση τις μετρήσεις αυτές η υπολογιζόμενη τιμή της σταθεράς καθώς και το αντίστοιχο σχετικό σφάλμα είναι:

	h ($\times 10^{-34} J \cdot s$)	$\sigma\%$
Φωτοβολία 1 :	5.83	12
Φωτοβολία 2 :	6.73	1.4
Φωτοβολία 3 :	7.13	7.5
Φωτοβολία 4 :	7.27	9.7

Όπως φαίνεται τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται για μέτρια ένταση ακτινοβολίας.

Θεωρώντας ότι το εκπαιδευτικό όφελος από την πραγματοποίηση του πειράματος είναι σημαντικό ακόμα κι αν υπάρχουν κάποια προβλήματα στην αξιοπιστία των πειραματικών μετρήσεων και τις αποκλίσεις από τις προβλέψεις της θεωρίας όπως παρουσιάζεται στο σχολικό βιβλίο, δημιουργήθηκε το φύλλο εργασίας που ακολουθεί. Ο σκοπός είναι να μπορεί να πραγματοποιηθεί ακόμα και σε μία διδακτική ώρα. Σε περίπτωση που υπάρχει διαθέσιμος χρόνος μπορεί να εμπλουτιστεί και με επιπλέον δραστηριότητες, όπως η επίδειξη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου σε φορτισμένο ηλεκτροσκόπιο με χρήση λάμπας UVC κ.α.

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο – Φύλλο εργασίας

A. Χαρακτηριστική καμπύλη της φωτοδιόδου.

Προετοιμασία της συσκευής

- Συνδέστε το τροφοδοτικό στην πρίζα του πάγκου εργασίας. Συνδέστε το βύσμα εξόδου του τροφοδοτικού στην υποδοχή της βάσης της συσκευής. Μετακινήστε το διακόπτη αναστροφής τάσης δεξιά (ορθή πολικότητα).
 - Περιστρέψτε το κουμπί ρύθμισης της φωτεινότητας του λαμπτήρα στη θέση «2».
 - Σύνδεσε το πολύμετρο της διάταξης (πολύμετρο 2) στην ομοαξονική υποδοχή με την ένδειξη «V», και περιστρέψτε τον επιλογέα στην κλίμακα των «2V DC»
 - Μετακινήστε τον διακόπτη SW1 στην επιλογή «V»
 - Συνδέστε το πολύμετρο του εργαστηρίου (πολύμετρο 1) στις κατάλληλες υποδοχές της βάσης με την ένδειξη «Τάση αποκοπής».
 - Περιστρέψτε το κουμπί ρύθμισης της τάσης ανόδου καθόδου τέρμα αριστερά (το βολτόμετρο δείχνει μηδέν)
1. Στην κατάλληλη υποδοχή στο μεταλλικό κάλυμμα του φωτοκυττάρου τοποθετήστε το **φίλτρο Νο 1**. Ξεκινώντας από το μηδέν αυξάνετε την τάση ανόδου καθόδου με βήμα 0,2V μέχρι την τιμή του 1V, στη συνέχεια ανά 0,5V μέχρι την μέγιστη τιμή των 3V και τέλος με βήμα 1V μέχρι την τιμή των 15V. Για κάθε τιμή της τάσης σημειώστε στα αντίστοιχα κελιά του πίνακα 1 την ένδειξη του πολυμέτρου 2 σε mV, που αντιστοιχεί στην ένταση του φωτορεύματος σε nA, για δύο διαφορετικές τιμές της φωτεινότητας του λαμπτήρα που αντιστοιχούν στις θέσεις «2» και «3» του διακόπτη.
 2. Στη συνέχεια μετακινήστε το διακόπτη αναστροφής τάσης προς τα αριστερά και περιστρέψτε το κουμπί του ποτενσιόμετρου τέρμα αριστερά ώστε να μηδενιστεί η τάση ανόδου – καθόδου. Αυξήστε την ανάστροφη τάση με βήμα 0,05V και συμπληρώστε τα αντίστοιχα κελιά του πίνακα 1, μέχρι η ένδειξη του βολτομέτρου μέσω της οποίας υπολογίζουμε το φωτόρευμα να μηδενιστεί.



Πίνακας 1

	Φωτ. 2	Φωτ. 3		Φωτ. 2	Φωτ. 3		Φωτ. 2	Φωτ. 3
V_1 (Volt)	V_2 (mV) i (nA)	V_2 (mV) i (nA)	V_1 (Volt)	V_2 (mV) i (nA)	V_2 (mV) i (nA)	V_1 (Volt)	V_2 (mV) i (nA)	V_2 (mV) i (nA)
-0.80			-0.15			4.00		
-0.75			-0.10			5.00		
-0.70			-0.05			6.00		
-0.65			0.00			7.00		
-0.60			0.20			8.00		
-0.55			0.40			9.00		
-0.50			0.60			10.00		
-0.45			0.80			11.00		
-0.40			1.00			12.00		
-0.35			1.50			13.00		
-0.30			2.00			14.00		
-0.25			2.50			15.00		
-0.20			3.00					

Παρατήρηση: Η επεξεργασία των μετρήσεων μπορεί να δοθεί σαν εργασία για το σπίτι, ώστε να υπάρξει ο απαιτούμενος χρόνος για την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας.

Μεταφέρετε τις μετρήσεις σε φύλλο εργασίας του MS-Excel και δημιουργήστε το γράφημα.

Τί παρατηρείτε για την μέγιστη τιμή της έντασης του ρεύματος για τις διαφορετικές εντάσεις της φωτεινής πηγής; Πως ερμηνεύεται η παρατήρησή σας.

Τί παρατηρείτε για την τάση αποκοπής για τις δύο διαφορετικές εντάσεις της ακτινοβολίας;

B. Μέτρηση της σταθεράς του Planck

Σύντομη θεωρία.

Σύμφωνα με τη φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein η μέγιστη κινητική ενέργεια με την οποία εξέρχονται τα ηλεκτρόνια από τη κάθοδο σχετίζεται με την συχνότητα της ακτινοβολίας και το έργο εξαγωγής ϕ του μετάλλου της καθόδου. Συγκεκριμένα:

$$K_{\max} = hf - \phi$$

Εφαρμόζοντας αναστροφή τάση τα ηλεκτρόνια επιβραδύνονται και για κάποια τιμή της τάσης (τάση αποκοπής) τα ηλεκτρόνια μόλις που δεν φτάνουν στην άνοδο. Για την τάση αυτή με βάση το θεώρημα έργου – ενέργειας ισχύει,

$$eV_0 = K_{\max}$$

οπότε η φωτοηλεκτρική εξίσωση γίνεται,

$$V_0 = \frac{h}{e} f - \frac{\phi}{e}$$

Σύμφωνα με την τελευταία εξίσωση η γραφική παράσταση της τάσης αποκοπής συναρτήσει της συχνότητας θα είναι ευθεία με κλίση,

$$k = \frac{h}{e}$$

Πραγματοποίηση του πειράματος

Επιλέξτε φωτεινότητα «2» μέσω του διακόπτη επιλογής της φωτεινότητας του λαμπτήρα.

1. Βάλτε το φίλτρο No 1 στην ειδική θέση μπροστά από την τρύπα του καλύμματος της φωτολυχνίας.
2. Περιστρέψτε το κουμπί του ποτενσιόμετρου μέχρι η ένδειξη του πολυμέτρου να μεταβάλλεται μεταξύ «-0,0001» και (-0,0000). Σημειώστε την μέτρηση στο αντίστοιχο κελί του πίνακα 2.
3. Επαναλάβετε τη διαδικασία και για τα υπόλοιπα φίλτρα και συμπληρώστε τις τιμές της τάσης αποκοπής στον πίνακα 2.

Πίνακας 2

	$\lambda_{\min} (nm)$	$f_{\max} (\times 10^{14} Hz)$	$V_0 (Volt)$
Φίλτρο No 1	590		
Φίλτρο No 2	515		
Φίλτρο No 3	485		
Φίλτρο No 4	470		
Φίλτρο No 5	420		

4. Υπολογίστε και συμπληρώστε την στήλη της συχνότητας στον πίνακα γράφοντας το αποτέλεσμα με δύο δεκαδικά ψηφία (λάβετε υπόψη τον πολλαπλασιαστή στην επικεφαλίδα της στήλης).
5. Αποτυπώστε σε κατάλληλο σύστημα αξόνων σε μιλιμετρικό χαρτί τα πειραματικά σημεία.
6. Σχεδιάστε την γραφική παράσταση της τάσης αποκοπής σαν συνάρτηση της συχνότητας.
7. Υπολογίστε την κλίση k της ευθείας και στη συνέχεια τη σταθερά του Planck από τη σχέση,

$$h = ke = \dots\dots\dots$$

Λαμβάνοντας υπόψη την τιμή, $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ για τη σταθερά του Planck υπολογίστε το σχετικό σφάλμα του υπολογισμού σας.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....