

# Άσκηση 20

## Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

### 20.1. Σκοπός

Στην άσκηση αυτή μελετάται το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και προσδιορίζεται πειραματικά η τιμή της σταθεράς του Planck.

### 20.2. Γενικά

#### 20.2.1. Εισαγωγή

Στα τέλη του 19ου αιώνα παρατηρήθηκε ότι μια μεταλλική επιφάνεια εκπέμπει ηλεκτρόνια όταν φωτίζεται. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Η συστηματικότερη μελέτη του φαινομένου έδειξε ότι:

- (α) ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται στη μονάδα του χρόνου είναι ανάλογος της έντασης του προσπίπτοντος φωτός,
- (β) το φαινόμενο δεν λαμβάνει χώρα όταν η συχνότητα του προσπίπτοντος φωτός είναι μικρότερη από κάποια ορισμένη τιμή,
- (γ) η μέγιστη ταχύτητα των εξερχομένων ηλεκτρονίων αυξάνει γραμμικά με τη συχνότητα του φωτός και δεν εξαρτάται από την έντασή του.

Η ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου στο πλαίσιο της κλασικής ηλεκτροδυναμικής θεωρίας δεν συναντούσε δυσκολίες σε σχέση με την παρατήρηση (α), ωστόσο ήταν αδύνατη αναφορικά με τις παρατηρήσεις (β) και (γ). Πράγματι, σύμφωνα με την κλασική ηλεκτροδυναμική, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του μετάλλου, όταν αυτό δέχεται την επίδραση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος, τίθενται σε ταλάντωση με συχνότητα ίση με αυτήν του φωτεινού κύματος και με πλάτος ανάλογο της έντασης της ηλεκτρικής συνιστώσας του πεδίου. Συνεπώς, σε πολύ ισχυρά ηλεκτρομαγνητικά πεδία, τα ηλεκτρόνια θα είχαν τη δυνατότητα να αποκτήσουν ενέργειες αρκετά μεγάλες ώστε να είναι σε θέση να εγκαταλείψουν το μέταλλο. Συμπερασματικά, η εκπομπή των ηλεκτρονίων από τα μέταλλα δεν θα έπρεπε να εξαρτάται από τη συχνότητα, αλλά μόνο από την ένταση του φωτός. Η ασυμφωνία της κλασικής θεωρίας με τα πειραματικά δεδομένα ερμηνεύτηκε το 1905 από τον Einstein, που για την εργασία του αυτή τιμήθηκε με το βραβείο Nobel.

#### 20.2.2. Θεωρία του Einstein

Σύμφωνα με την πρόταση του Einstein, στην περίπτωση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, το φως συμπεριφέρεται σαν να αποτελείται από διακριτά κβάντα (**φωτόνια**) που το καθένα έχει ενέργεια

$$E = h \nu \quad (20.1)$$

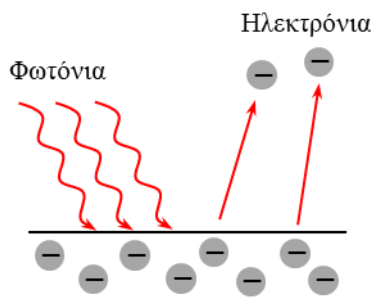
όπου  $h$  είναι η **σταθερά του Planck**, ίση με  $6,626 \times 10^{-34}$  J·s, και  $\nu$  η συχνότητα του φωτός.

Έτσι, όταν στη μεταλλική επιφάνεια προσπέσουν φωτόνια, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του μετάλλου, απορροφώντας την ενέργεια των φωτονίων, μπορούν να ξεφύγουν από το μέταλλο, αρκεί η ενέργεια αυτή να είναι μεγαλύτερη από το **έργο εξόδου** του μετάλλου, δηλαδή από το έργο που απαιτείται για να αποσπαστεί το ηλεκτρόνιο από το στερεό (Σχ. 20.1). Από την Εξ.

(20.1) και τον νόμο διατήρησης της ενέργειας προκύπτει η **φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein**

$$h \nu = E_k + \varphi \quad (20.2)$$

όπου  $E_k$  είναι η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που εγκατέλειψαν το μέταλλο και  $\varphi$  το έργο εξόδου του μετάλλου.



**Σχήμα 20.1.** Σχηματική παράσταση της αρχής του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Αυτή η πρόταση ερμηνεύει εύκολα τις τρεις παραπάνω παρατηρήσεις. Η παρατήρηση (α) ερμηνεύεται από το γεγονός ότι η ένταση μιας φωτεινής δέσμης είναι ανάλογη του αριθμού των φωτονίων που προσπίπτουν στη μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα χρόνου. Είναι επομένως προφανές ότι το ρεύμα των εξερχομένων ηλεκτρονίων είναι ανάλογο της έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας.

Η παρατήρηση (β) ερμηνεύεται από την Εξ. (20.2), όπου φαίνεται ότι για

$$h \nu < \varphi \quad (20.3)$$

η απορροφούμενη ενέργεια από κάθε ηλεκτρόνιο δεν επαρκεί για την έξοδό του από το μέταλλο.

Η παρατήρηση (γ) προκύπτει επίσης από την Εξ. (20.2), καθώς αυτή μπορεί να γραφτεί και ως

$$E_k = h \nu - \varphi \quad (20.4)$$

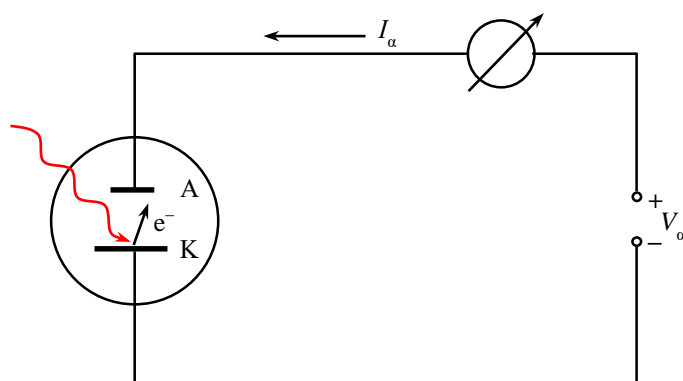
δηλαδή η κινητική ενέργεια των εξερχομένων ηλεκτρονίων αυξάνει γραμμικά με τη συχνότητα του φωτός.

### 20.2.3. Το φωτοκύτταρο κενού

Στην παρούσα άσκηση η μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου γίνεται με τη βοήθεια ενός φωτοκυττάρου κενού, το οποίο στην ουσία είναι μια δίοδος κενού, η κάθοδος της οποίας είναι κατασκευασμένη από ένα φωτοευαίσθητο υλικό.

Όταν η κάθοδος (K) φωτίζεται (Σχ. 20.2), εκπέμπει **φωτοηλεκτρόνια** ( $e^-$ ), η συλλογή των οποίων γίνεται από την άνοδο (A). Η τιμή της ανοδικής τάσης  $V_a$  συνήθως επιλέγεται να είναι τέτοια ώστε να γίνεται η συλλογή όλων των φωτοηλεκτρονίων (κορεσμός του ανοδικού ρεύματος  $I_a$ ). Κάτω από αυτές τις συνθήκες, το ανοδικό ρεύμα είναι ανάλογο της έντασης του προσπίπτοντος φωτός, επομένως, μετρώντας το ανοδικό ρεύμα, μπορούμε να προσδιορίσουμε την ένταση του φωτός. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του φωτοκυττάρου, που προσδιορίζουν την ποιότητά του, είναι η ευαισθησία, που συνήθως δίνεται σε μικροαμπέρ ανά λούμεν ( $\mu A/lm$ ), η φασματική απόκριση, που δίνεται από τον κατασκευαστή με τη μορφή γραφικής

παράστασης, και το ρεύμα σκότους, από το οποίο εξαρτάται η ελάχιστη ένταση του φωτός που μπορεί να ανιχνευτεί με τη συγκεκριμένη **φωτοδιόδο**.



**Σχήμα 20.2.** Σχηματική διάταξη λειτουργίας του φωτοκυττάρου κενού.

Η φωτοδιόδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και δίχως την πηγή ανοδικής τάσης. Στην περίπτωση αυτή, τα φωτοηλεκτρόνια που φθάνουν στην άνοδο την φορτίζουν αρνητικά, δημιουργώντας στα άκρα της φωτοδιόδου μια διαφορά δυναμικού, η τιμή της οποίας εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα του φωτός και όχι από την έντασή του. Το μέγεθος που είναι ανάλογο της έντασης του φωτός είναι το ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα της φωτοδιόδου όταν αυτή βραχυκυκλώνεται, δηλαδή όταν η άνοδος και η κάθοδος συνδέονται με ένα σύρμα ή με έναν μετρητή ρεύματος που έχει «μηδενική» εσωτερική αντίσταση. Αν η αντίσταση του μετρητή δεν είναι μικρή, τότε εξαιτίας της εκθετικής ενεργειακής κατανομής των εξερχομένων ηλεκτρονίων, η πτώση τάσης που δημιουργείται από το **φωτόρρευμα** δημιουργεί ένα επιβραδυντικό πεδίο μεταξύ ανόδου και καθόδου, με επακόλουθο τα φωτόμετρα αυτού του είδους να έχουν λογαριθμική κλίμακα, κάτι που πολλές φορές σκοπίμως επιδιώκεται (π.χ. στις φωτογραφικές μηχανές, βιντεοκάμερες κ.λπ.).

Το φωτοκύτταρο, ή φωτοδιόδος κενού, παλαιότερα εύρισκε ευρεία εφαρμογή σε όλους του τομείς της τεχνολογίας και επιστήμης όπου απαιτείται η μέτρηση και ανίχνευση του φωτός. Σήμερα, σε μεγάλο βαθμό έχει αντικατασταθεί από το κρυσταλλικό φωτοκύτταρο που είναι λιγότερο ευπαθές, έχει πολύ μικρότερες διαστάσεις και λειτουργεί με βάση το εσωτερικό φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Η φωτοδιόδος κενού εξακολουθεί ακόμα να είναι αναντικατάστατη όπου απαιτείται η μέτρηση φωτεινής ακτινοβολίας πολύ μικρής έντασης, όπως, λόγου χάρη, στην αστρονομία, στη φασματομετρία, στα συστήματα σκόπευσης, στα συστήματα παρακολούθησης δορυφόρων, στις διόπτρες νυκτός, σε φωτοπολλαπλασιαστές κ.λπ.

### 20.3. Μέθοδος

Στην άσκηση αυτή το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αξιοποιείται για τη μέτρηση της σταθεράς του Planck και η μέθοδος στηρίζεται στην Εξ. (20.4).

Με την είσοδο μονοχρωματικού φωτός στο φωτοκύτταρο, η φωτοκάθοδος αρχίζει να εκπέμπει ηλεκτρόνια, οι κινητικές ενέργειες των οποίων καλύπτουν μια περιοχή τιμών από μηδέν μέχρι μια μέγιστη τιμή. Η παρατηρούμενη διασπορά των κινητικών ενεργειών οφείλεται σε συγκρούσεις που προηγήθηκαν μέσα στη φωτοκάθοδο, πριν τα ηλεκτρόνια εξέλθουν, όπως επίσης και στην ενεργειακή κατανομή των ηλεκτρονίων μέσα στο μέταλλο. Προφανώς, τη μέγιστη κινητική ενέργεια έχουν μόνον εκείνα τα ηλεκτρόνια που εξήλθαν από την κάθοδο

μέσω ελαστικών συγκρούσεων, δηλαδή με μηδενική απώλεια της ενέργειάς τους. Συνεπώς, μόνο η μέγιστη κινητική ενέργεια των εξερχομένων ηλεκτρονίων ικανοποιεί την Εξ. (20.4).

Η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων μπορεί να μετρηθεί με πολλούς και ποικίλους τρόπους. Στη μέθοδο του επιβραδυντικού πεδίου, που είναι και η απλούστερη, μεταξύ ανόδου και καθόδου του φωτοκυττάρου εφαρμόζεται ένα επιβραδυντικό ηλεκτρικό πεδίο. Η τιμή του αρνητικού δυναμικού της ανόδου επηρεάζει έντονα το ανοδικό ρεύμα, εφόσον στην άνοδο καταφθάνουν μόνον εκείνα τα ηλεκτρόνια που έχουν κινητική ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη του δυναμικού φράγματος, ενώ τα υπόλοιπα ηλεκτρόνια επιστρέφουν στην κάθοδο. Η τιμή του αρνητικού δυναμικού της ανόδου στην οποία παρατηρείται μηδενισμός του ανοδικού ρεύματος ονομάζεται **δυναμικό αποκοπής**. Από το δυναμικό αποκοπής,  $U_{απ}$ , προκύπτει η τιμή της μέγιστης κινητικής ενέργειας

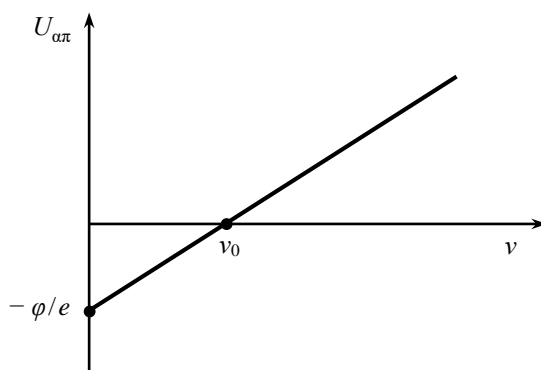
$$E_{k, \max} = e U_{απ} \quad (20.5)$$

όπου  $e$  είναι το ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου.

Με βάση την Εξ. (20.5), η Εξ. (20.4) λαμβάνει τη μορφή

$$U_{απ} = \frac{h \nu}{e} - \frac{\varphi}{e} \quad (20.6)$$

Έτσι, φωτίζοντας διαδοχικά τη φωτοκάθοδο με φως διαφορετικών συχνοτήτων και μετρώντας, με τον έναν ή τον άλλον τρόπο, τα αντίστοιχα δυναμικά αποκοπής, μπορούμε να χαράξουμε την πειραματική καμπύλη  $U_{απ} = f(\nu)$  (Σχ. 20.3).



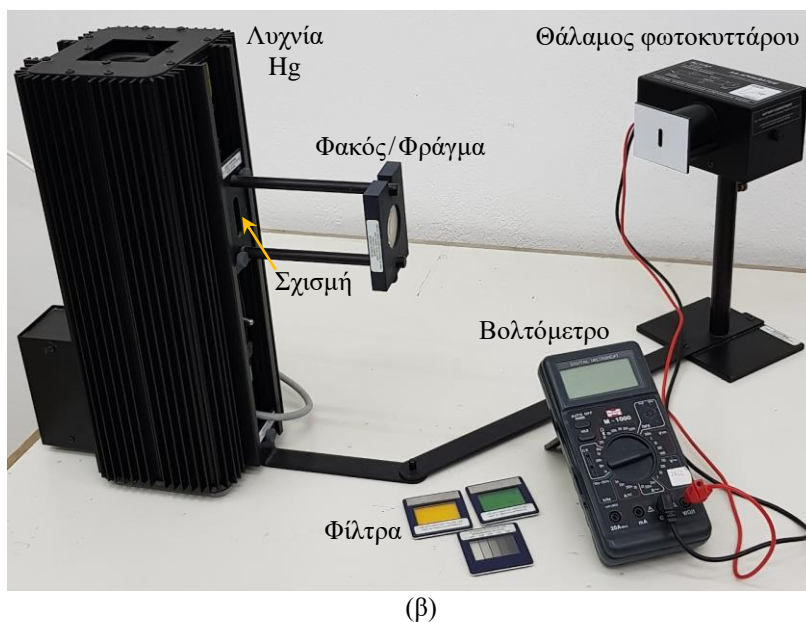
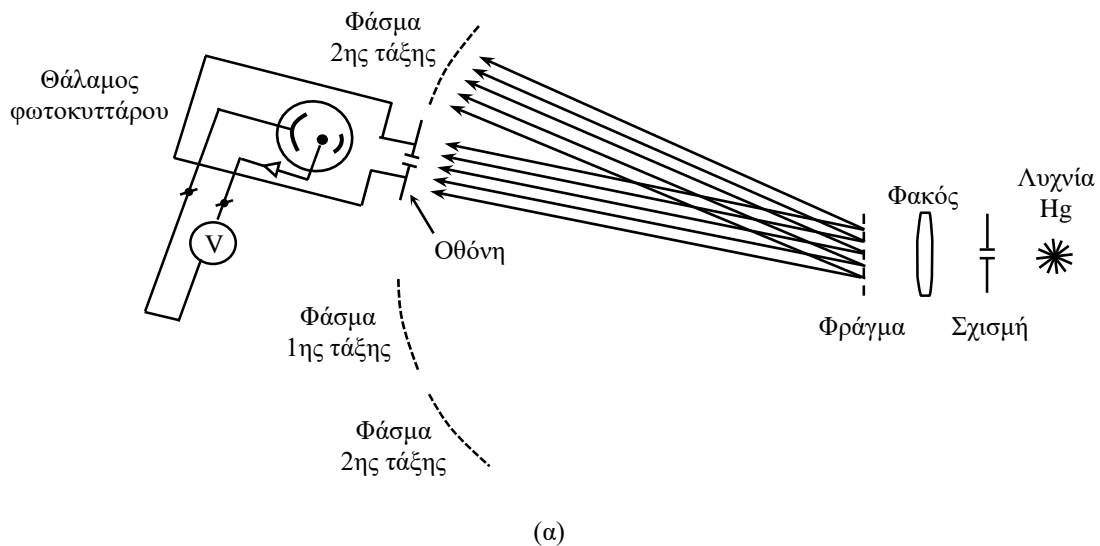
**Σχήμα 20.3.** Γραφική παράσταση του δυναμικού αποκοπής  $U_{απ}$  ως συνάρτησης της συχνότητας  $\nu$  του φωτός που προσπίπτει στη φωτοκάθοδο.

Σύμφωνα με την Εξ. (20.6), η γραφική παράσταση της συνάρτησης  $U_{απ} = f(\nu)$  παριστάνει μια ευθεία, με κλίση ίση με  $h/e$ , που τέμνει τον άξονα του δυναμικού σε μια αρνητική τιμή ίση με  $\varphi/e$ . Μετρώντας πειραματικά την κλίση  $h/e$ , από τη γνωστή τιμή του φορτίου  $e$  του ηλεκτρονίου μπορούμε να προσδιορίσουμε τη σταθερά του Planck. Από την ίδια γραφική παράσταση μπορούμε να προσδιορίσουμε και το έργο εξόδου  $\varphi$  του υλικού της φωτοκαθόδου, όπως και την οριακή συχνότητα  $\nu_0$  του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, η τιμή της οποίας άμεσα προσδιορίζει το όριο της φασματικής απόκρισης ενός φωτοκυττάρου.

#### 20.4. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη φαίνεται στο Σχ. 20.4 και αποτελείται από δύο βασικά τμήματα: (α) την πηγή φωτός και το σύστημα ανάλυσής του και (β) το φωτοκύτταρο κενού με την ειδική μονάδα μέτρησης του δυναμικού αποκοπής των φωτοηλεκτρονίων.

Μια λυχνία υδραργύρου εκπέμπει ένα σύνολο φασματικών γραμμών, οι συχνότητες των οποίων είναι γνωστές με ακρίβεια και πέντε από αυτές είναι αρκετά ισχυρές. Η δέσμη φωτός σχηματίζεται από μία σχισμή, ακολούθως γίνεται παράλληλη με τη βοήθεια ενός φακού και προσπίπτει κάθετα σε ένα οπτικό φράγμα με 600 χαραγές/mm, όπου αναλύεται στις φασματικές γραμμές της. Μετά το φράγμα, σε κάποια απόσταση, βρίσκεται ο θάλαμος του φωτοκυττάρου, ο οποίος μπορεί να περιστρέφεται οριζόντια γύρω από κατακόρυφο άξονα που περνά από τη θέση του φράγματος. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η δυνατότητα επιλογής της επιθυμητής γραμμής που θα εισέλθει στον θάλαμο.



**Σχήμα 20.4.** (α) Σχηματική παράσταση και (β) φωτογραφία της πειραματικής διάταξης για τη μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

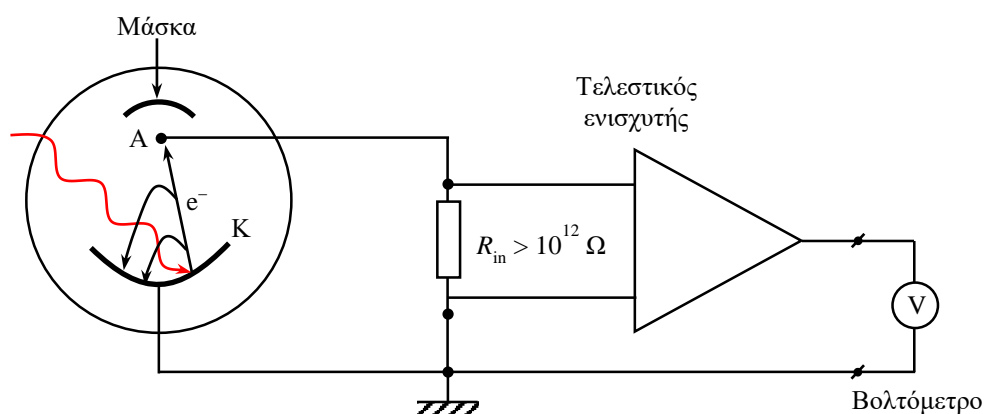
### 20.4.1. Μέτρηση της τάσης αποκοπής

Στην παρούσα άσκηση το επιβραδυντικό δυναμικό δημιουργείται από τα ίδια τα φωτοηλεκτρόνια που φθάνουν στην άνοδο και τη φορτίζουν αρνητικά (Σχ. 20.5). Έτσι, το δυναμικό της ανόδου πλησιάζει ασυμπτωτικά την τιμή  $U_{απ}$  και σταθεροποιείται στην τιμή αυτή. Ταυτόχρονα, η ροή των ηλεκτρονίων που φθάνουν στην άνοδο μηδενίζεται

ασυμπτωτικά. Στην ιδανική περίπτωση, όταν επέλθει ισορροπία, κανένα ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να φτάσει στην άνοδο.

Στην πράξη, όμως, ένα μικρό μέρος του ηλεκτρικού φορτίου διαφεύγει από την άνοδο, ακόμα και όταν αυτή μονώνεται πολύ καλά. Εξαιτίας αυτής της διαρροής, το δυναμικό της ανόδου ισορροπεί σε μια τιμή που είναι λίγο μικρότερη του δυναμικού αποκοπής, επιτρέποντας σε ένα μικρό μέρος των ταχύτερων ηλεκτρονίων να καταφθάνουν στην άνοδο για να καλύψουν τη διαρροή. Η ισορροπία του συστήματος θα διαταραχθεί δραστικά όταν χρησιμοποιηθεί ένα κοινό βολτόμετρο για τη μέτρηση του δυναμικού της ανόδου. Το ρεύμα κατανάλωσης του οργάνου λειτουργεί ως σημαντική διαρροή, με επακόλουθο μια πολύ λανθασμένη μέτρηση του δυναμικού αποκοπής. Για τον λόγο αυτό, η μέτρηση πρέπει να γίνεται με σύστημα ανοικτού κυκλώματος (μηδενικής κατανάλωσης ρεύματος) ή τουλάχιστον με μετρητή που έχει μεγάλη αντίσταση εισόδου (εδώ είναι μεγαλύτερη από  $10^{12} \Omega$ ).

Στην πειραματική διάταξη, το ρεύμα κατανάλωσης του βολτομέτρου αντλείται από την έξοδο του τελεστικού ενισχυτή, στον οποίο ο συντελεστής ενίσχυσης τάσης επιλέγεται να είναι πολύ κοντά στη μονάδα. Επειδή, για δεδομένη διαρροή του φορτίου από την άνοδο, μεγαλύτερη ένταση του προσπίπτοντος φωτός εξασφαλίζει μικρότερο σχετικό σφάλμα στη μέτρηση του δυναμικού αποκοπής, η ένταση του φωτός στο πείραμά μας επιλέχθηκε να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε η μετρούμενη τάση να είναι ελάχιστα μικρότερη από το δυναμικό αποκοπής.



Σχήμα 20.5. Σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης για τη μέτρηση του δυναμικού αποκοπής.

Μετρώντας τις τάσεις αποκοπής για τις πέντε γνωστές γραμμές του υδραργύρου, μπορούμε να σχεδιάσουμε την πειραματική καμπύλη  $U_{\text{απ}} = f(\nu)$

## Βιβλιογραφία

1. E. H. Wichmann, *Κβαντική Φυσική (Μαθήματα Φυσικής Berkeley, Τόμος 4)* (Αθήνα, 1985), 1.41-1.46
2. R. A. Serway, C. J. Moses, C. A. Moyer, *Σύγχρονη Φυσική* (Ηράκλειο, 2000), 2.5.
3. H. D. Young, R. A. Freedman, *Πανεπιστημιακή Φυσική με Σύγχρονη Φυσική, Τόμος Β': Ηλεκτρομαγνητισμός – Οπτική – Σύγχρονη Φυσική* (Αθήνα, 2022), 38.1.
4. ΕΜΠ, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής, Τόμος Ι* (Αθήνα, 2010), σ. 277-288.

## 20.5. Εκτέλεση

1. Θέστε σε λειτουργία τη λυχνία υδραργύρου.
2. Με τη βοήθεια ενός λευκού χαρτιού, παρατηρήστε το φάσμα του υδραργύρου πρώτης τάξης (μικρές γωνίες εκτροπής) και δεύτερης τάξης. Συμμετρικά, στις ίδιες γωνίες εκτροπής, υπάρχει όμοια εικόνα (βλ. Σχ. 20.4). Τα φάσματα πρώτης τάξης είναι εντονότερα και για τον λόγο αυτό είναι σκόπιμο η περαιτέρω εργασία να γίνει σε ένα από αυτά. Λόγω ιδιομορφίας στην κατασκευή του οπτικού φράγματος, το ένα από τα δύο φάσματα πρώτης τάξης είναι ευκρινέστερο, οπότε επιλέξτε αυτό για τις μετρήσεις. Σημειώνεται ότι η τελευταία γραμμή (η υπεριώδης) δεν είναι ορατή από το ανθρώπινο μάτι, αλλά φαίνεται στην οθόνη του θαλάμου του φωτοκυττάρου, επειδή η επιφάνειά της είναι καλυμμένη με ειδική φθορίζουσα ουσία.
3. Μετακινήστε τον θάλαμο του φωτοκυττάρου στην περιοχή του φάσματος που επιλέξατε. Φροντίστε ώστε η κίτρινη γραμμή να εισέλθει στο άνοιγμα της οθόνης του θαλάμου και θέστε σε λειτουργία το κύκλωμα του φωτοκυττάρου.
4. Με προσοχή, για να μην καταστραφεί η φθορίζουσα ουσία, τοποθετήστε στην οθόνη του θαλάμου το κίτρινο φίλτρο, το οποίο αποτρέπει την είσοδο των πιο ενεργών φωτονίων του φάσματος. Το πλαίσιο του φίλτρου είναι κατασκευασμένο από μαγνητικό υλικό και συγκρατείται στην οθόνη με απλή επαφή.
5. Συνδέστε το ψηφιακό βολτόμετρο στην έξοδο της διάταξης του θαλάμου. Θα παρατηρήσετε μια ασυμπτωτική άνοδο της μετρούμενης τάσης, η οποία θα σταθεροποιηθεί μετά από λίγο. Σημειώστε την τιμή αυτής της τάσης ως τάση αποκοπής,  $U_{\text{απ}}$ , για τη συγκεκριμένη γραμμή.
6. Επαναλάβετε το βήμα 4 για την πράσινη γραμμή με το πράσινο φίλτρο. Για τις υπόλοιπες τρεις γραμμές δεν είναι απαραίτητη η χρήση φίλτρου. Μετρήστε τις τάσεις αποκοπής και για αυτές τις γραμμές, και επαναλάβετε τις μετρήσεις σε αντίστροφη σειρά των γραμμών, δηλαδή ξεκινώντας από το υπεριώδες προς το κίτρινο, συμπληρώνοντας τον Πίνακα I.
7. Επιλέξτε μία από τις εντονότερες γραμμές και τοποθετήστε πάνω στην οθόνη το άχρωμο φίλτρο. Το φίλτρο αυτό έχει περιοχές με διαπερατότητα 80, 60, 40 και 20%. Μετρήστε την τάση αποκοπής για διαπερατότητα 80 και 40%, για μία γραμμή, ώστε να διαπιστώσετε ότι η τάση αποκοπής δεν εξαρτάται από την ένταση του φωτός.

**Πίνακας I**

A/A γραμμής	Χρώμα γραμμής $\lambda$ (nm)	$\nu$ ( $10^{14}$ Hz)	$U_{\text{απ}}$ (V)	
1	Κίτρινο (578)	5,19		
2	Πράσινο (546)	5,49		
3	Κυανό (436)	6,88		
4	Ιώδες (405)	7,41		
5	Υπεριώδες (365)	8,22		

## 20.6. Επεξεργασία των μετρήσεων

1. Λαμβάνοντας ως τιμή της  $U_{απ}$  τη μέση τιμή των δύο μετρήσεων, σχεδιάστε τη γραφική παράσταση της τάσης αποκοπής  $U_{απ}$  ως συνάρτηση της συχνότητας  $\nu$ .
2. Υπολογίστε την κλίση,  $b \pm \delta b$ , της ευθείας  $U_{απ} = f(\nu)$  και από αυτήν υπολογίστε τη σταθερά του Planck,  $h \pm \delta h$  [Εξ. (20.6)]. Υπολογίστε επίσης το έργο εξόδου,  $\varphi \pm \delta\varphi$ , σε eV, καθώς και την οριακή συχνότητα,  $\nu_0 \pm \delta\nu_0$ .
3. Η παραδεκτή τιμή της σταθεράς  $h$  είναι  $6,63 \times 10^{-34}$  J·s. Σε περίπτωση που η τιμή της  $h$  που βρήκατε διαφέρει από την παραπάνω τιμή, ποιο είναι κατά τη γνώμη σας το κυριότερο αίτιο για αυτή τη διαφορά;
4. Σχολιάστε τα αποτελέσματα του πειράματος με το άχρωμο φίλτρο.