

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. Εισαγωγή

Στα τέλη του δεκάτου ενάτου αιώνα παρατηρήθηκε ότι μια μεταλλική επιφάνεια εκπέμπει ηλεκτρόνια όταν αυτή φωτίζεται. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Η συστηματικότερη μελέτη του φαινομένου έδειξε ότι:

- (α) ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται σε μονάδα χρόνου είναι ανάλογος της έντασης του προσπίπτοντος φωτός
- (β) το φαινόμενο δε λαμβάνει χώρα όταν η συχνότητα του προσπίπτοντος φωτός είναι μικρότερη από κάποια ορισμένη τιμή και
- (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 στα πλαίσια της κλασικής ηλεκτροδυναμικής θεωρίας, ενώ δεν συναντούσε δυσκολίες σε σχέση με την παρατήρηση (α), ήταν αδύνατη σε σχέση 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 δε θα έπρεπε να εξαρτάται από τη συχνότητα, αλλά μόνον 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.

20.2.1. 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

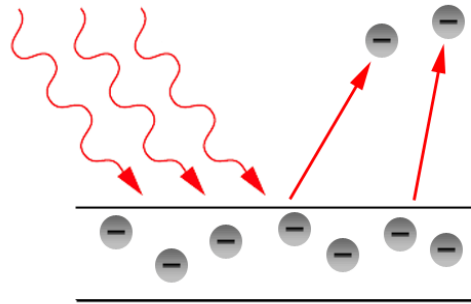
$$E = h\nu \quad (20.1)$$

όπου h είναι η **σταθερά του Planck**, ίση με $6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, και ν η συχνότητά 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 φ το έργο εξόδου του μετάλλου.



Σχήμα 20.1 Σχηματική παράσταση της αρχής του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Η παραπάνω πρόταση ερμηνεύει εύκολα τις τρεις 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 ενέργεια που απορροφάται από κάθε ηλεκτρόνιο δεν επαρκεί για την έξοδό του από το στερεό.

Η παρατήρηση (γ) επίσης προκύπτει από την Εξ. (20.2). Πράγματι, η Εξ. (20.2) μπορεί να γραφτεί και ως:

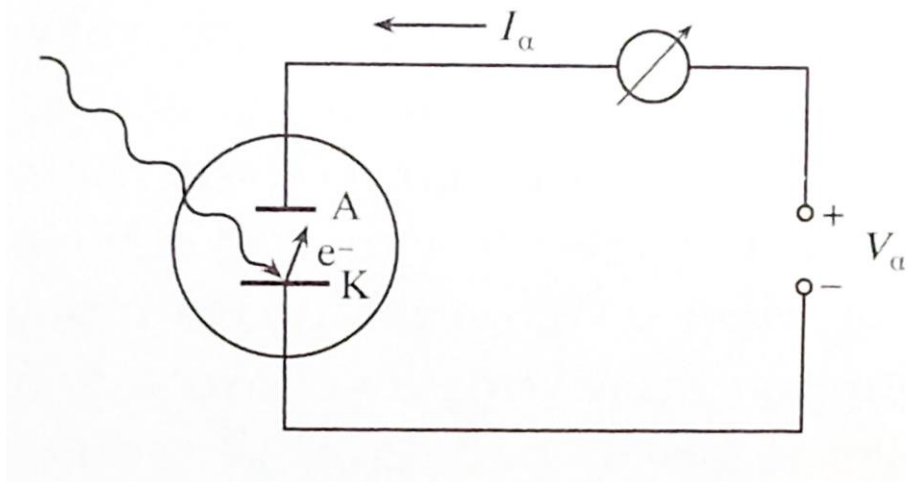
$$E_k = h\nu - \varphi \quad (20.4)$$

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

20.2.2. Το φωτοκύτταρο κενού

Στην παρούσα εργασία η μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου γίνεται με τη βοήθεια ενός φωτοκύτταρου κενού, το οποίο στην ουσία είναι μια δίοδος κενού (βλ. Σχ. 20.2), η κάθοδος Κ, της οποίας είναι κατασκευασμένη από ένα φωτοευαίσθητο υλικό.

Όταν η κάθοδος, Κ, φωτίζεται, εκπέμπει **φωτοηλεκτρόνια**, e^- , η συλλογή των οποίων γίνεται από την άνοδο, Α. 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 και συνεπώς, 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 **φωτοδίοδο**.



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 καταφθάνουν 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 **φωτόρευμα** 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 η 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 π.χ. στην αστρονομία, φασματομετρία, στα συστήματα σκόπευσης, παρακολούθησης δορυφόρων, στις διόπτρες νυκτός, φωτοπολλαπλασιαστές κ.λπ.

20.3. Μέθοδος μέτρησης της σταθεράς του Planck

Στην εργασία αυτή το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αξιοποιείται για τη μέτρηση της σταθεράς του Planck. 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 μία 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, μόνον 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 έντονα επηρεάζει 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

$$E_{k,max} = e U_{απ} \quad (20.5)$$

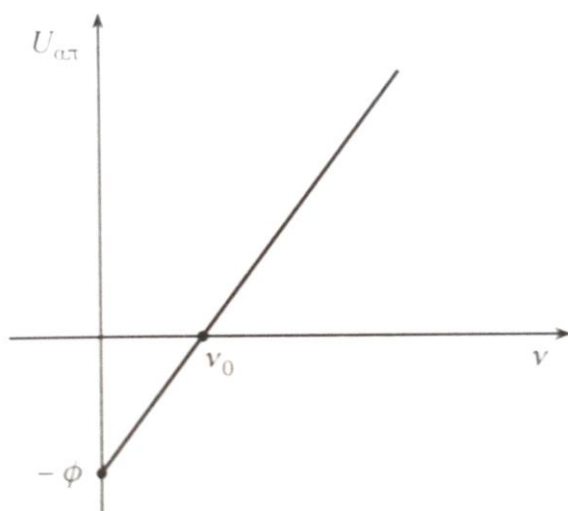
όπου e είναι το ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου.

Με βάση την Εξ. (20.5), η (20.4) παίρνει 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 ένα ή τον άλλο τρόπο τα αντίστοιχα δυναμικά αποκοπής, μπορούμε να χαράξουμε την πειραματική καμπύλη $U_{απ} = f(\nu)$.

Σύμφωνα με την Εξ. (20.6) η γραφική παράσταση της συνάρτησης $U_{απ} = f(\nu)$ (βλ. Σχ. 20.3) παριστάνει μια ευθεία, η κλίση της οποίας είναι h/e και, η οποία, τέμνει τον άξονα του δυναμικού σε μια αρνητική τιμή ίση με το δυναμικό του έργου εξόδου φ .



Σχήμα 20.3 Γραφική παράσταση του δυναμικού αποκοπής $U_{απ}$, ως συνάρτησης της συχνότητας, ν , του φωτός που προσπίπτει στη φωτοκάθοδο. Από την κλίση της ευθείας προσδιορίζεται η σταθερά του Planck, h , από την τεταγμένη στην αρχή προσδιορίζεται η οριακή συχνότητα ν_0 , του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και από την τεταγμένη στην αρχή το έργο εξόδου, φ , του υλικού της φωτοκαθόδου.

Μετρώντας πειραματικά την κλίση h/e , από τη γνωστή τιμή του φορτίου του ηλεκτρονίου e , μπορούμε να προσδιορίσουμε την σταθερά του Planck, h . Από την ίδια γραφική παράσταση μπορούμε να προσδιορίσουμε και το έργο εξόδου της φωτοκαθόδου, φ , όπως και την οριακή συχνότητα του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, ν_0 , η τιμή της οποίας άμεσα προσδιορίζει το όριο της φασματικής απόκρισης ενός φωτοκυττάρου.

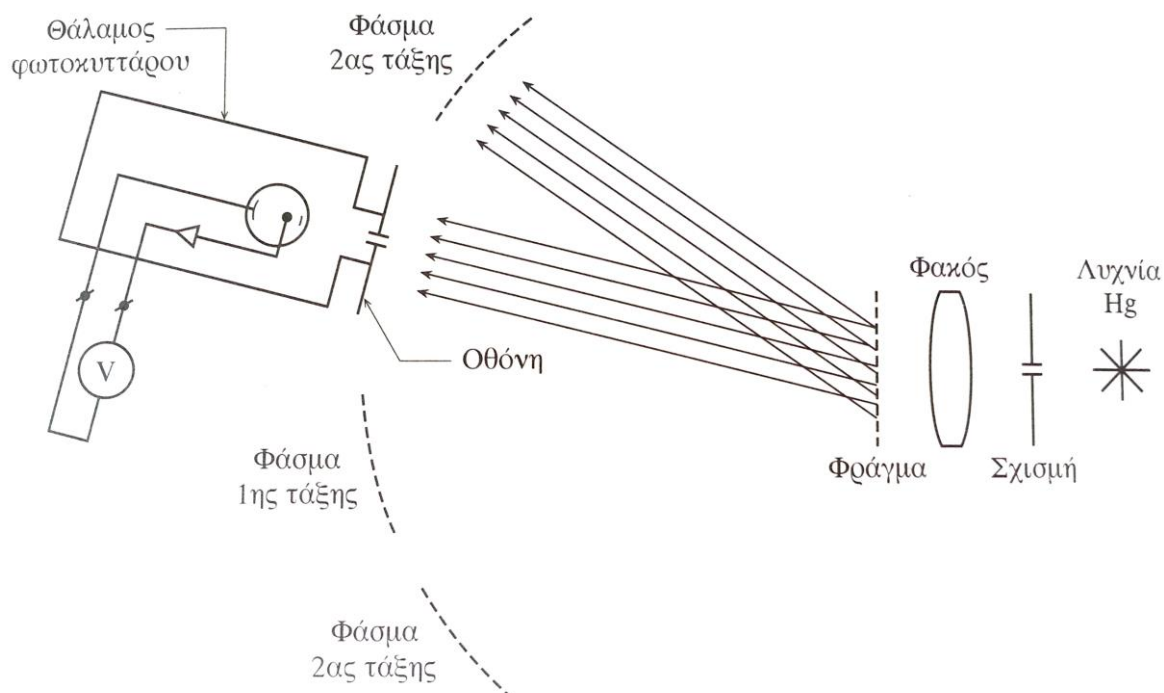
20.4. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από δύο βασικά τμήματα που είναι:

(α) η πηγή φωτός και το σύστημα ανάλυσής του και

(β) το φωτοκύτταρο κενού με τη ειδική μονάδα μέτρησης του δυναμικού αποκοπής των φωτοηλεκτρονίων.

Η σχηματική παράσταση της πειραματικής διάταξης δίνεται στο Σχ. 20.4. 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 μια σχισμή, στη συνέχεια 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 οριζοντίως 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 στο θάλαμο.



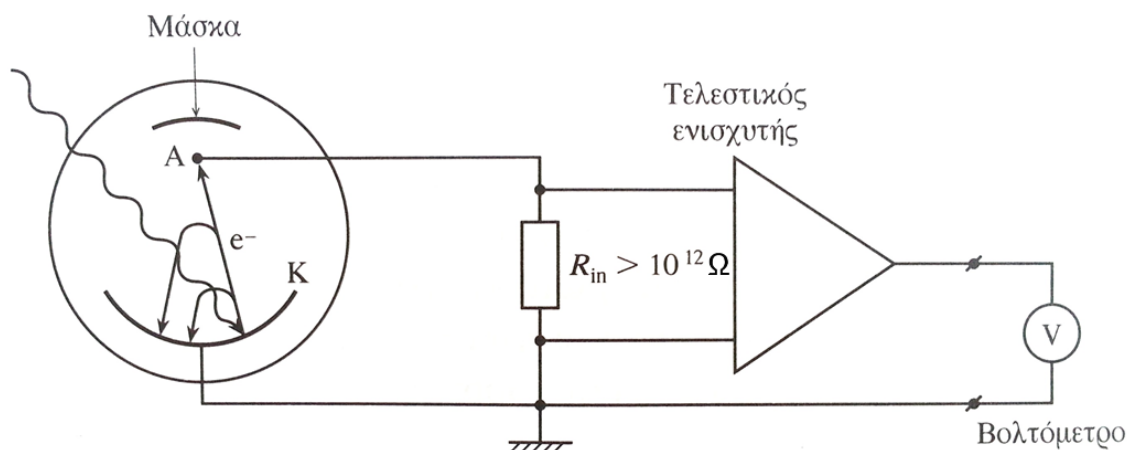
Σχήμα 20.4 Σχηματική παράσταση της αρχής λειτουργίας της πειραματικής διάταξης για τη μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

20.4.1. Μέτρηση της τάσης αποκοπής

Στην παρούσα εργασία το επιβραδυντικό δυναμικό δημιουργείται από τα ίδια τα φωτοηλεκτρόνια που καταφθάνουν στην άνοδο και τη φορτίζουν αρνητικά (βλ. Σχ. 20.5). Έτσι, το δυναμικό της ανόδου πλησιάζει ασυμπτωτικά την τιμή U_{ap} και σταθεροποιείται στην τιμή αυτή. Ταυτόχρονα, η ροή των ηλεκτρονίων που καταφθάνουν στην άνοδο ασυμπτωτικά μηδενίζεται. 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, αν για τη μέτρηση του δυναμικού της ανόδου χρησιμοποιηθεί ένα κοινό βολτόμετρο. Το ρεύμα κατανάλωσης του οργάνου λειτουργεί ως σημαντική διαρροή, με επακόλουθο μία πολύ λανθασμένη μέτρηση του δυναμικού αποκοπής. Για το λόγο αυτό η μέτρηση πρέπει να γίνεται με σύστημα ανοικτού κυκλώματος (μηδενικής κατανάλωσης ρεύματος) ή τουλάχιστον με μετρητή που έχει μεγάλη αντίσταση εισόδου. Στην διάταξη της άσκησης είναι μεγαλύτερη από $10^{12} \Omega$.

Στην πειραματική διάταξη (βλ. Σχ. 20.5) το ρεύμα κατανάλωσης του βολτομέτρου αντλείται από την έξοδο του τελεστικού ενισχυτή, στον οποίο ο συντελεστής ενίσχυσης τάσης επιλέγεται να είναι πολύ κοντά στην 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 την τάση αποκοπής.



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

20.4.2. Μέτρηση της σταθεράς του Planck

Μετρώντας τις τάσεις αποκοπής για τις πέντε γνωστές γραμμές του υδραργύρου, μπορούμε να υπολογίσουμε την κλίση της ευθείας $U_{ap} = f(\nu)$ (βλ. Σχ. 20.3) και από τη γνωστή τιμή του φορτίου, e , στη συνέχεια να προσδιορίσουμε τη σταθερά του Planck, h , το έργο εξόδου, ϕ ,

όπως επίσης και την οριακή συχνότητα, ν_0 , του φωτοηλεκτρικού φαινομένου για τη συγκεκριμένη φωτοκάθοδο.

Βιβλιογραφία

1. *Μαθήματα Φυσικής Berkeley*. Τόμος 4: *Κβαντική Φυσική*. (Αθήνα 1978). Παράγρ. 42-46.
2. H.D. Young, *Πανεπιστημιακή Φυσική, Ηλεκτρομαγνητισμός, Οπτική, Σύγχρονη Φυσική*, Παράγρ. 40.1 και 41.2 (Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα 1994).
3. Κ. Δ. Αλεξόπουλος, *Γενική Φυσική*, Τόμος Γ', *Ατομική και Πυρηνική Φυσική*. Εισαγωγή, Παράγρ. 1 – 4.

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 πιο έντονα 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 πιο ευκρινές. Επιλέξτε αυτό για τις μετρήσεις. Σημειώνουμε 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 και τον επιλογέα της κλίμακας του στη θέση 40 V dc. Θα παρατηρήσετε μια ασυμπτωτική άνοδο της μετρούμενης τάσης. Μετά από περίπου πέντε λεπτά η τάση θα έχει σταθεροποιηθεί. 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, δηλ. ξεκινώντας από το υπεριώδες προς το κίτρινο. Συμπληρώστε τον Πίνακα I.
7. Επιλέξτε μία από τις πιο έντονες γραμμές και τοποθετήστε πάνω στην οθόνη το άχρωμο φίλτρο. Το φίλτρο 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 Ι

A/A γραμμής	Χρώμα γραμμής (μήκος κύματος) λ (nm)	Συχνότητα ν (10^{14} Hz)	Τάση αποκοπής $U_{\text{απ}}$ (V)
1	Κίτρινο (578)	5,19	
2	Πράσινο (546)	5,49	
3	Κυανούν (436)	6,88	
4	Ιώδες (405)	7,41	
5	Υπεριώδες (365)	8,22	

20.6. Επεξεργασία των μετρήσεων

1. Σε ένα σχεδιάγραμμα, με άξονες $U_{\text{απ}}$ και ν , σημειώστε τα πειραματικά σημεία που περιέχει ο Πίνακας Ι.
2. Υπολογίστε με τη γραφική μέθοδο (ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ Γ.7, σελ 32) την κλίση της ευθείας $U_{\text{απ}} = f(\nu)$ και από αυτήν υπολογίστε τη σταθερά h , το έργο εξόδου φ σε eV, την οριακή συχνότητα ν_0 , όπως επίσης και τα αντίστοιχα σφάλματά τους.
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.