



Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο: Προσδιορισμός της σταθεράς του Planck και του έργου εξαγωγής φωτο-ηλεκτρονίων

1. Σκοπός

Σκοπός της εργαστηριακής αυτής άσκησης είναι αφ' ενός η διερεύνηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και η μέτρηση χαρακτηριστικών μεγεθών που επαληθεύουν τους νόμους που το διέπουν και αφ' ετέρου ο προσδιορισμός της σταθεράς του Planck και του έργου εξαγωγής.

2. Εισαγωγή

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο βασίζεται σε ένα πείραμα ιδιαίτερα σημαντικό στην ιστορία της φυσικής. Αποτέλεσε τη βάση για την πειραματική απόδειξη του κβαντικού χαρακτήρα του φωτός. Όλες οι προσπάθειες να ερμηνευτεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο με τη βοήθεια της μέχρι τότε επικρατούσας κυματικής θεωρίας του φωτός απέβησαν άκαρπες. Ο Α. Einstein κατάφερε το 1905, βασισμένος στην κβαντική ιδέα του Planck, να ερμηνεύσει το φαινόμενο, διατυπώνοντας την άποψη, ότι το φως αποτελείται από ένα ρεύμα διακριτών πακέτων ενέργειας, των λεγόμενων φωτονίων (κβάντων). Αυτό αποτέλεσε την αρχή για την ανατροπή της επικρατούσας άποψης για την συγκρότηση της ύλης και την ανάπτυξη στην συνέχεια της ατομικής θεωρίας.

3. Θεωρία

Ως γνωστόν η ενέργεια E που κατέχει κάθε φωτόνιο εξαρτάται από μια σταθερά, την σταθερά του Planck και την συχνότητα ν του φωτός

$$E = h \cdot \nu \quad (1)$$

Ετσι κατά κάποιον τρόπο, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο δεν είναι παρά το αποτέλεσμα της μεταφοράς της ολικής ενέργειας κάθε φωτονίου σε ένα ηλεκτρόνιο μιας μεταλλικής επιφάνειας. Ένα μέρος αυτής της ενέργειας που μεταφέρεται χρησιμοποιείται για την εξαγωγή, την απελευθέρωση του ηλεκτρονίου από το μέταλλο και το άλλο μέρος της, εφ' όσον περισσεύει, χρησιμοποιείται για να δώσει στο ελεύθερο ηλεκτρόνιο κινητική ενέργεια. Η υπόθεση αυτή οδήγησε τον Α. Einstein στην διατύπωση της εξίσωσης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, για την οποία το 1921 τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ:

$$h \cdot \nu = W + \frac{1}{2} \cdot m \cdot \nu^2 \quad (2)$$

Στην σχέση (2) ως W συμβολίζεται το "έργο εξαγωγής", ήτοι η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται, ώστε το ηλεκτρόνιο να απελευθερωθεί από το μέταλλο. Η τιμή της εξαρτάται από την φύση του μετάλλου. Το δεύτερο σκέλος της (2) εκφράζει την κινητική ενέργεια που αποκτά το ελευθερωμένο ηλεκτρόνιο.

Η ενέργεια του φωτονίου $h\nu$ θα πρέπει να είναι αρκετή, να υπερβαίνει το έργο εξαγωγής W , ώστε να μπορέσει τόσο να ελευθερώσει το ηλεκτρόνιο, όσο να του προσδώσει και κινητική ενέργεια. Εάν η συχνότητα ν του φωτός είναι μικρότερη μιας οριακής τιμής συχνότητας ν_{op} , όπου $\nu_{op} = W/h$, τότε δεν εμφανίζονται και δεν μπορούν να δημιουργηθούν φωτοηλεκτρόνια.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο υλοποιείται πειραματικά με τη βοήθεια μιας λυχνίας, η οποία βρίσκεται σε κενό ή περιέχει αέριο σε χαμηλή πίεση και φέρει δύο μεταλλικά ηλεκτρόδια: την κάθοδο και την άνοδο. Η κάθοδος αποτελείται από αγωγίμο μέταλλο και καλύπτει μια κυλινδρική επιφάνεια.

Οι λειτουργίες της λυχνίας για την επιβεβαίωση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου φαίνονται στις τρεις εικόνες που παρατίθενται (σχήματα 1-3) και παρουσιάζουν κατά έναν σχηματικό και απλουστευμένο τρόπο τον μηχανισμό απόσπασης του φωτοηλεκτρονίου από την κάθοδο και τον τρόπο μέτρησης παραμέτρων του φαινομένου.

- i) Η λυχνία είναι συνδεδεμένη σε κλειστό κύκλωμα (σχήμα 1), στο οποίο σε σειρά υπάρχει αμπερόμετρο για τη μέτρηση του ρεύματος που διαρρέει το κύκλωμα. Η πρόσπτωση φωτονίων στην κάθοδο, εφ' όσον η ενέργειά τους είναι αρκετή, έχει ως συνέπεια την απόσπαση ηλεκτρονίων απ' αυτήν, την ελευθέρωση ηλεκτρονίων, ονομαζόμενα φωτοηλεκτρόνια, τα οποία κινούμενα μέσα στον χώρο της λυχνίας φθάνουν στην άνοδο και έτσι δημιουργούν ρεύμα.
- ii) Στο κύκλωμα τώρα έχει προστεθεί μια πηγή τροφοδοσίας (σχήμα 2), η οποία αναπτύσσει ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια, στην άνοδο και στην κάθοδο, μια διαφορά δυναμικά, με αποτέλεσμα, τα αποσπώμενα φωτοηλεκτρόνια εκτός της αρχικής τους κινητικής ενέργειας, να αποκτούν επιπλέον σημαντική κινητική ενέργεια επιταχυνόμενα στο ηλεκτρικό πεδίο. Κινούμενα προς την άνοδο πλέον συναντούν μόρια του αερίου, τα οποία, μέσω κρούσεων μ' αυτά, ιονίζουν. Έτσι ο αριθμός των ηλεκτρονίων που φθάνουν στην άνοδο πολλαπλασιάζεται και εξαρτάται κατά κάποιο τρόπο αρχικά από την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου.
- iii) Αντίστροφη πόλωση: Όπως φαίνεται στο σχήμα 3, στο κύκλωμα έχει αντιστραφεί η πόλωση στην πηγή τροφοδοσίας και έχει ρυθμιστεί η τιμή της τάσης της, ενόσω η λυχνία φωτίζεται, ώστε στο αμπερόμετρο να φαίνεται μηδενικό ρεύμα. Η τάση αυτή ονομάζεται **τάση αποκοπής** $V_{αποκ}$ και είναι χαρακτηριστική της ενέργειας των φωτονίων που πέφτουν στην κάθοδο. Πράγματι, εφ' όσον η ενέργεια των φωτονίων είναι μεγαλύτερη από το έργο εξαγωγής των φωτοηλεκτρονίων, αυτά διαθέτουν κινητική ενέργεια, με αποτέλεσμα να κινούνται προς την άνοδο και να καταγράφεται ένα μικρό αλλά μετρήσιμο ανοδικό ρεύμα. Εάν όμως εφαρμοστεί αντίστροφη τάση, τα ηλεκτρόνια εμποδίζονται από το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται και παραμένουν πλησίον της καθόδου, ως ένα νέφος ηλεκτρονίων. Εν προκειμένω

τότε έχει εξισωθεί η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων με την ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου. Η τιμή της τάσης αποκοπής $V_{αποκ}$ εύκολα προκύπτει από την Σχέση 3:

$$E_{κιν} = e \cdot |V_{αποκ}| = h \cdot \nu - W \quad (3)$$

$$V_{αποκ} = \frac{h \cdot \nu - W}{e} \quad (4)$$

Η ενέργεια των ηλεκτρονίων και το έργο εξαγωγής εκφράζονται συνήθως σε ηλεκτρονιοβόλτ (eV):

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

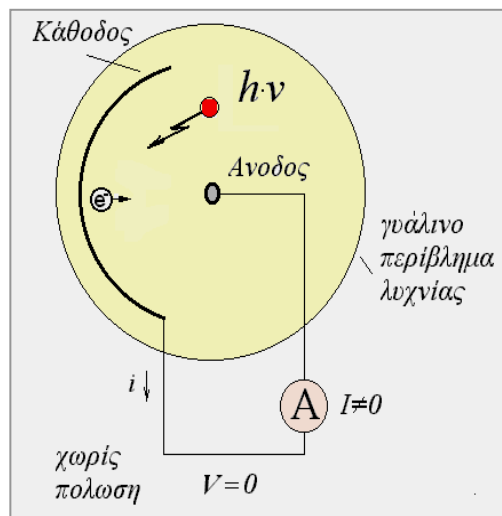
Ετσι η σταθερά του Planck έχει τιμή ίση με:

$$\begin{aligned} h &= 6.6260755 \times 10^{-34} \text{ J s} \\ &= 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV s} \end{aligned}$$

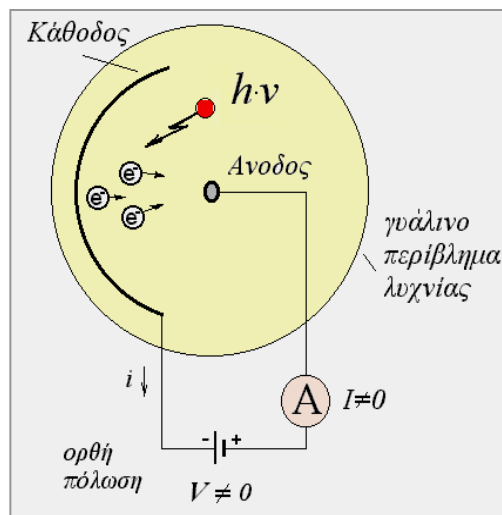
Στον πίνακα που παρατίθεται δίνονται ενδεικτικά χαρακτηριστικές τιμές για το έργο εξαγωγής μερικών στοιχείων. Το έργο εξαγωγής αποτελεί μια σταθερά για το υλικό και εξαρτάται σημαντικά από τον βαθμό καθαρότητας της επιφάνειας από προσμίξεις.

Στοιχείο	Έργο εξαγωγής σε [eV]
Αλουμίνιο	4.3
Άνθρακας	5.0
Άργυρος	4,3
Νάτριο	2.7
Νικέλιο	5.1
Πυρίτιο	4.8
Χαλκός	4.7
Χρυσός	5.1

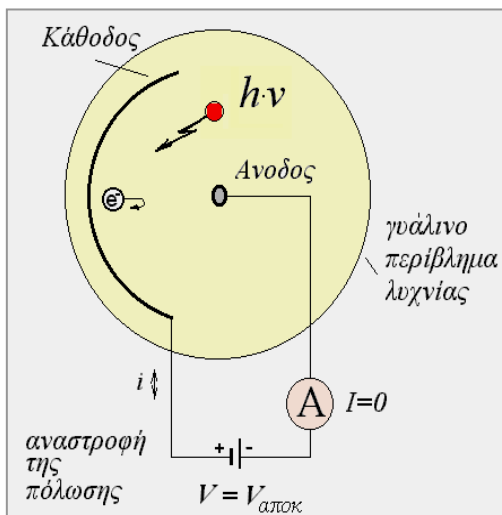
Σχήμα 1.: Λυχνία φωτοκύτταρου με το κύκλωμα της. Το φωτόνιο που πέφτει στην κάθοδο, δημιουργεί ένα φωτοηλεκτρόνιο, το οποίο την εγκαταλείπει

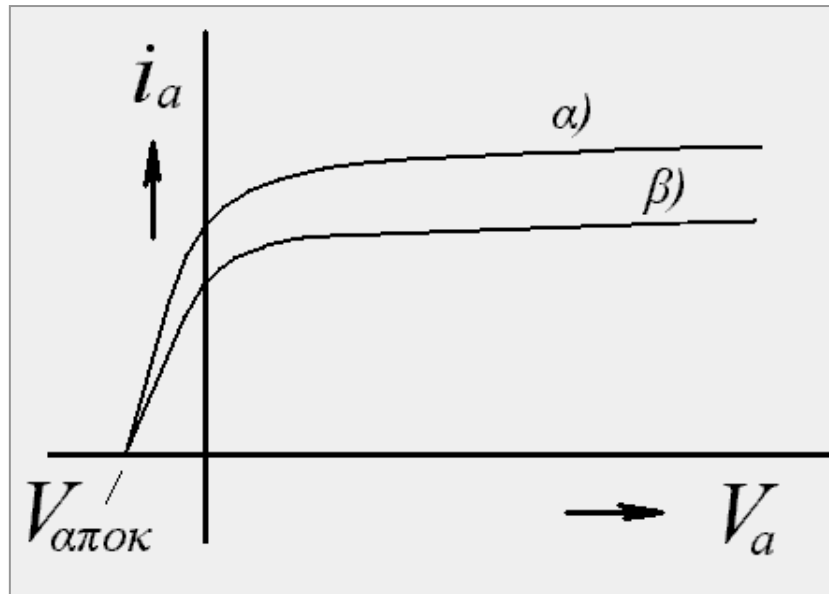


Σχήμα 2.: Λυχνία φωτοκύτταρου με το κύκλωμα της. Το φωτόνιο που πέφτει στην κάθοδο, δημιουργεί ένα φωτοηλεκτρόνιο, το οποίο επιταχυνόμενο αποκτά ενέργεια ικανή να δημιουργήσει δευτερογενώς μέσω κρούσεων ιονισμό και σε άλλα ηλεκτρόνια, τα οποία οδεύουν προς την άνοδο



Σχήμα 3.: Λυχνία φωτοκύτταρου με το κύκλωμα της. Το φωτόνιο που πέφτει στην κάθοδο, δημιουργεί ένα φωτοηλεκτρόνιο, το οποίο δεν φτάνει στην άνοδο λόγω της αντίστροφης τάσης που έχει εφαρμοστεί, με αποτέλεσμα να μην καταγράφεται ανοδικό ρεύμα.

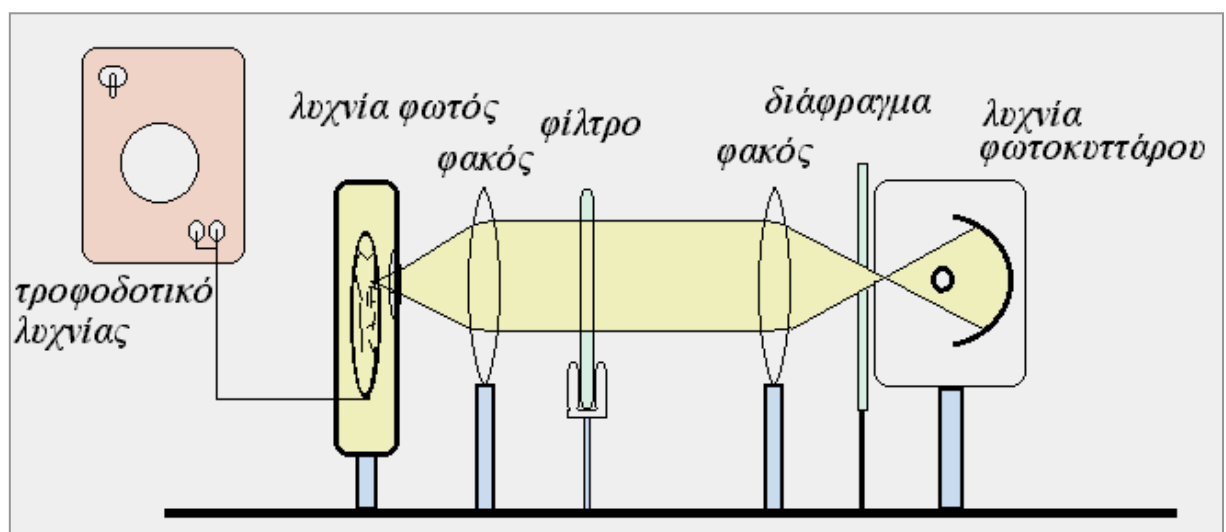




Σχήμα 4.: Γραφική παράσταση του ανοδικού ρεύματος i_a συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης V_a για δύο διαφορετικές εντάσεις ακτινοβολίας α) και β).

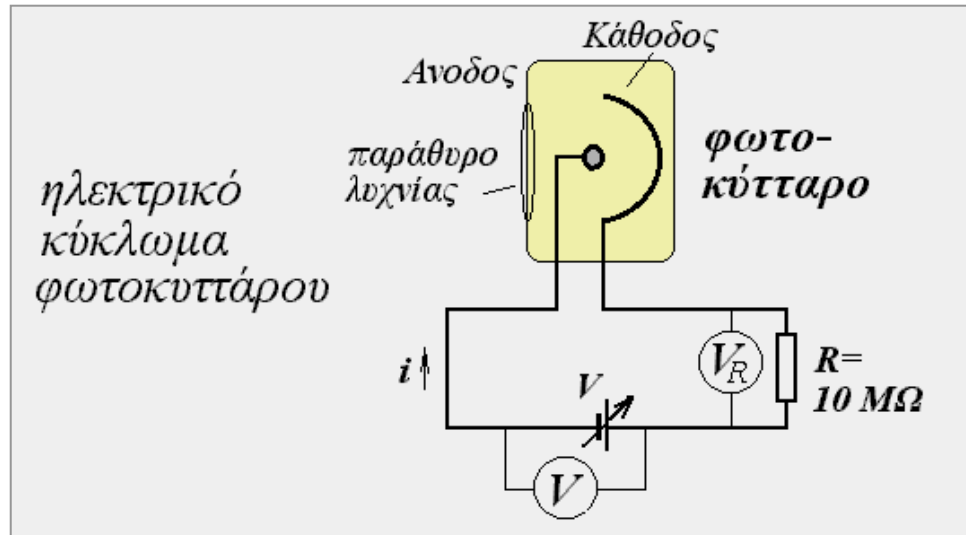
4. Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται κατά έναν σχηματικό τρόπο στο παρακάτω σχήμα (σχ. 5). Αποτελείται από **α)** μια λυχνία φώτος με το τροφοδοτικό της, **β)** δύο φακούς, **γ)** ένα φίλτρο και ένα διάφραγμα και **δ)** την λυχνία του φωτοκύτταρου.



Σχήμα 5.: Σχηματική παράσταση του οπτικού μέρους της πειραματικής διάταξης

Τα εξαρτήματα αυτά είναι τοποθετημένα σε σειρά επάνω σε μια οπτική τράπεζα, έτσι ώστε το φως της λυχνίας να οδηγείται στην οπή του φωτοκύτταρου, ενόσω η δέσμη του περνάει μέσα από το φίλτρο που έχει κάθε φορά επιλεγεί και το διάφραγμα. Οι δύο φακοί φροντίζουν για την ευθυγράμμιση της δέσμης και για την επάρκεια σε φωτισμό του φωτός που κατευθύνεται προς το φωτοκύτταρο. Για να μειωθούν οι εξωγενείς παράγοντες, η διάταξη αυτή προστατεύεται με ένα υφασμάτινο κάλυμμα από το φως του περιβάλλοντος.



Σχήμα 6.: Σχηματική παράσταση του ηλεκτρικού κυκλώματος στην πειραματική διάταξη

Το **ηλεκτρικό κύκλωμα** του φωτοκύτταρου φαίνεται στο σχήμα 6. Τα άκρα της ανόδου και της καθόδου της λυχνίας του φωτοκύτταρου συνδέονται με τροφοδοτικό συνεχούς, σταθεροποιημένης και μεταβλητής τιμής τάσης. Σε παράλληλη συνδεσμολογία σ' αυτήν έχει συνδεθεί ένα πολύμετρο που λειτουργεί ως βολτόμετρο, το οποίο καταγράφει την διαφορά δυναμικού ανάμεσα στην άνοδο και στην κάθοδο. Βάσει του δεύτερου νόμου του Kirchhoff, που βρίσκει εφαρμογή στο κύκλωμά της διάταξής μας, η ανοδική τάση V_A είναι ίση με :

$$V_A = V - i_A \cdot R \quad (4)$$

Ενα δεύτερο πολύμετρο, επίσης ως βολτόμετρο, έχει συνδεθεί στα άκρα της αντίστασης που παρεμβάλλεται εν σειρά στο κύκλωμα τροφοδοσίας της λυχνίας. Το βολτόμετρο αυτό μετράει την πτώση τάσης στην αντίσταση, της οποίας η τιμή $R = 10 \text{ M}\Omega$, και έτσι έμμεσα μετράει το ανοδικό ρεύμα i_a , δηλ. το ρεύμα που διαπερνάει το κύκλωμα.

$$i_A = \frac{V_R}{R} \quad (5)$$

Ετσι με αντικατάσταση των παραπάνω σχέσεων (5) και (4) προκύπτει η τιμή της ανοδικής τάσης V_A :

$$V_A = V - V_R \quad (6)$$

Το ανοδικό ρεύμα i_A μπορεί να μετρηθεί και με *άμεσο τρόπο*, εάν αντικατασταθεί η αντίσταση και το βολτόμετρο στα άκρα της με ένα ευαίσθητο αμπερόμετρο, μεγάλης ακρίβειας.

Το φωτοκύτταρο που χρησιμοποιείται είναι τύπου αερίου. Η διαφανής υάλινη λυχνία εμπεριέχει ποσότητα αερίου με αρκετά χαμηλή πίεση (10^{-3} mmHg). Αποτελείται από την μεγάλη μεταλλική επιφάνεια, ως κάθοδος και ένα συρμάτινο ηλεκτρόδιο στο κέντρο της, ως άνοδος. Η επιφάνεια αυτή επιτρέπει εύκολα την εξαγωγή φωτοηλεκτρονίων, όταν το φως που θα πέσει επάνω της είναι ορατό έως υπέρυθρο.

Το φωτοηλεκτρόνιο που αρχικώς δημιουργήθηκε από την πρόσπτωση ενός φωτονίου, εγκαταλείπει την επιφάνεια της καθόδου και κινούμενο προς την άνοδο επιταχύνεται, κάτω από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργεί η εφαρμοζόμενη τάση. Στην διαδρομή του έχει αποκτήσει κινητική ενέργεια, η οποία είναι ικανή να ιονίσει, μέσω αλληπάλληλων κρούσεων, τα μόρια του αερίου που θα συναντήσει, με αποτέλεσμα δευτερογενώς να παράγονται περισσότερα ηλεκτρόνια. Μ' αυτόν τον τρόπο, από ένα αρχικό φωτοηλεκτρόνιο παράγονται καταγιστικά πλείστα ηλεκτρόνια. Αυτός είναι ένας μηχανισμός ενίσχυσης του φαινομένου.

Ενόσω η δημιουργία του πρωτογενούς φωτοηλεκτρονίου εξαρτάται από την ενέργεια του φωτονίου, ο αριθμός των δευτερογενώς παραγόμενων ηλεκτρονίων εξαρτάται από την διαφορά δυναμικού στα άκρα ανάμεσα στην άνοδο και στην κάθοδο. Όσο μεγαλύτερη η τιμή της τάσης τόσο περισσότερα ηλεκτρόνια δημιουργούνται, με αποτέλεσμα να διαρρέεται η αντίσταση από περισσότερο ανοδικό ρεύμα. Το φαινόμενο αυτό της ενίσχυσης παρουσιάζει κάμψη μετά από κάποια τιμή της τάσης και πέρα. Έτσι εμφανίζονται **συνθήκες κορεσμού**, όπου όσο και εάν αυξηθεί η τάση τροφοδοσίας, το ανοδικό ρεύμα να παραμένει σταθερό. Αυτό είναι λογικό, αφού το πλήθος των ιονισμένων μορίων του αερίου δεν μπορεί να αυξάνεται ατελείωτα. Ο αριθμός των μορίων του αερίου μέσα στην λυχνία είναι πεπερασμένος και επέρχεται με τον χρόνο μια ισορροπία ανάμεσα στα μόρια που έχουν ιονιστεί και έχουν τροφοδοτήσει με ελεύθερα ηλεκτρόνια το κύκλωμα και στα μόρια που εξουδετερώθηκαν ηλεκτρικά με την επανασύνδεση των ηλεκτρονίων τους.

Το φαινόμενο του κορεσμού περιγράφεται στην γραφική παράσταση 4., όπου αυξανόμενη της τάσης τροφοδοσίας, μετά από μια αρχική σχεδόν γραμμική άνοδο του ανοδικού ρεύματος επέρχεται μια κάμψη της τιμής του και στην συνέχεια σταθερότητα.

5. Εργασίες

Η διαδικασία εκτέλεσης του πειράματος αποτελείται από δύο ξεχωριστά μέρη:

Πρώτο μέρος

1. Αναγνωρίζουμε βάσει των σχημάτων την πειραματική διάταξη και την συνδεσμολογία της.

2. Βάζουμε σε σειρά τα μέρη που την αποτελούν και πραγματοποιούμε το ηλεκτρικό κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 6. Τοποθετούμε το πράσινο φίλτρο στην αντίστοιχη θέση.
3. Ανοίγουμε το τροφοδοτικό της λυχνίας φωτός και το τροφοδοτικό τροφοδοσίας τάσης της λυχνίας του φωτοκυττάρου.
4. Έχοντας εξασφαλίσει επαρκή φωτισμό στο φωτοκύτταρο ξεκινάμε με μια τιμή $V_A = 2 \text{ Volt}$ και καταγράφουμε την πτώση τάσης στην αντίσταση R . Καταχωρούμε τις δυο τιμές στον πίνακα τιμών I.
5. Μεταβάλλουμε την τιμή V_A άλλες εννέα φορές, συλλέγοντας τα δεδομένα.
6. Επαναλαμβάνουμε τα παραπάνω βήματα (3-5) συλλέγοντας μια δεύτερη σειρά μετρήσεων κάτω από τις ίδιες συνθήκες, έχοντας μόνο φροντίσει ο φωτισμός του φωτοκυττάρου να είναι αισθητά μεγαλύτερος. Καταχωρούμε τα δεδομένα στον πίνακα τιμών (δεύτερη σειρά)
7. Κάνοντας τους αντίστοιχους υπολογισμούς (στήλες 4 και 6) κατασκευάζουμε την γραφική παράσταση $I_a = f(V_a)$. Τοποθετούμε τα πειραματικά δεδομένα ως σημεία και χαράσσουμε για τις δύο σειρές δεδομένων τις αντίστοιχες καμπύλες.
8. Προεκτείνουμε τις δύο καμπύλες, ώστε από την τομή με τον άξονα των χ να διαβάσουμε την τάση αποκοπής $V_{\text{αποκ}}$.
9. Σχολιάζουμε το αποτέλεσμα. Επιβεβαιώνονται οι νόμοι που διέπουν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο;
10. Κάνουμε μια αναφορά στα σφάλματα που υπεισήλθαν στο πείραμά μας και στις μετρήσεις μας.

Δεύτερο μέρος

1. Αναγνωρίζουμε βάσει των σχημάτων την πειραματική διάταξη και την συνδεσμολογία της.
2. Βάζουμε σε σειρά τα μέρη που την αποτελούν και πραγματοποιούμε το ηλεκτρικό κύκλωμα που φαίνεται στο σχήμα 6. Τοποθετούμε το μπλέ φίλτρο στην αντίστοιχη θέση.
3. Ανοίγουμε το τροφοδοτικό της λυχνίας φωτός και το τροφοδοτικό τροφοδοσίας τάσης της λυχνίας του φωτοκυττάρου.
4. Αλλάζουμε την πολικότητα στην τάση τροφοδοσίας, αντιμεταθέτοντας τα δύο βύσματα των καλωδίων (κόκκινο με μαύρο και αντίστροφα).
5. Στρέφουμε προσεκτικά το κουμπί του τροφοδοτικού τάσης, μέχρις ότου μηδενιστεί το ανοδικό ρεύμα I_A (μηδενιστεί η τάση V_R στα άκρα της αντίστασης).
6. Διαβάζουμε την τιμή της τάσης V (τόρα είναι $V = V_A$, λόγω μηδενισμού της V_R) και καταχωρούμε την τιμή της στον πίνακα τιμών II.
7. Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία χρησιμοποιώντας κάθε φορά ένα διαφορετικού χρώματος φίλτρο (γαλάζιο, πράσινο, κίτρινο, κόκκινο).
8. Με τα δεδομένα του πίνακα τιμών II κατασκευάζουμε την γραφική παράσταση της συνάρτησης $V_{\text{αποκ}} = f(\lambda)$, χαράσοντας ανάμεσα στα πειραματικά σημεία την καλύτερη ευθεία (καμπύλη);).
9. Αν προκύψει μια ευθεία τότε ερμηνεύουμε το διάγραμμα και βρίσκουμε από την κλίση της και την διατομή της αντίστοιχα την σταθερά του Planck και το έργο εξαγωγής του υλικού της επιφάνειας της καθόδου.
10. Σχολιάζουμε τα αποτελέσματα.
11. Κάνουμε μια αναφορά στα σφάλματα που υπεισήλθαν στο πείραμά μας και στις μετρήσεις μας.

Πίνακας μετρήσεων II

A/A	Χρώμα φίλτρου	Μήκος κύματος λ [nm]	Τάση αποκοπής $V_{αποκ}$ [mV]
1	Μπλέ		
2	γαλάζιο		
3	Πράσινο		
4	Κίτρινο		
5	κόκκινο		

Πίνακας μετρήσεων I

	A/A	Τάση τροφοδοσίας V [V]	Ανοδική τάση V [V]	Τάση στα άκρα αντίστασης V_R [mV]	Ανοδικό ρεύμα i [μA]
Πρώτη σειρά	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				
Δεύτερη σειρά	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				