

ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ

1. Η σχέση $V_{\alpha\pi} - f$ σε φωτολυχνία

Όταν γράφουμε την φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein στη μορφή $eV_{\alpha\pi} = hf - \phi$ συνήθως με ϕ εννοούμε το έργο εξαγωγής της καθόδου. Όμως αποδεικνύεται θεωρητικά, αλλά επιβεβαιώνεται και πειραματικά, ότι η σωστή, αν και διαισθητικά απρόσμενη μορφή της φωτοηλεκτρικής εξίσωσης, όταν εφαρμόζεται σε μία φωτολυχνία, είναι: $eV_{\alpha\pi} = hf - \phi_{\text{ανόδου}}$ [1-3]. Η σχέση αυτή προκύπτει παίρνοντας υπόψη και την τάση επαφής ανόδου-καθόδου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το έργο εξαγωγής που βρίσκουμε από τη γραφική παράσταση $V_{\alpha\pi} - f$ να είναι το έργο εξαγωγής του μετάλλου της ανόδου και όχι της καθόδου.

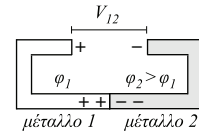
Η τάση διμεταλλικής επαφής. Όταν δύο διαφορετικά μέταλλα 1 και 2, που έχουν διαφορετικά έργα εξαγωγής έρχονται σε ηλεκτρική επαφή μεταξύ τους, τότε ηλεκτρόνια από το μέταλλο με το μικρότερο έργο εξαγωγής ϕ_1 (J) διαχέονται προς το μέταλλο με το μεγαλύτερο έργο εξαγωγής ϕ_2 (J) με αποτέλεσμα μεταξύ των μετάλλων να δημιουργείται διαφορά δυναμικού V_{12} (σχ. 1) η οποία ισούται με

$$V_{12} = \frac{\phi_2 - \phi_1}{e}$$

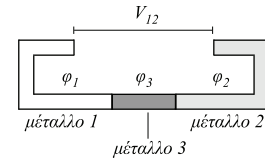
Αν μεταξύ των μετάλλων 1 και 2 παρεμβληθεί ένα μέταλλο 3 (σχ. 2) με έργο εξαγωγής ϕ_3 τότε η διαφορά δυναμικού μεταξύ των μετάλλων 1 και 2 παραμένει αμετάβλητη:

$$V_{12} = V_{13} + V_{32} = \frac{\phi_3 - \phi_1}{e} + \frac{\phi_2 - \phi_3}{e} = \frac{\phi_2 - \phi_1}{e}$$

Σε κλειστή αγώγιμη διαδρομή με διαφορετικά μέταλλα το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων επαφής είναι μηδέν και έτσι ποτέ δεν τις παίρνουμε υπόψη. Στην περίπτωση αυτή οι τάσεις επαφής δεν μπορούν να δημιουργήσουν ρεύμα και επομένως δεν μπορούμε μια τάση επαφής να την μετρήσουμε απλά με ένα βολτόμετρο.



Σχήμα 1



Σχήμα 2

Σε μια φωτολυχνία η άνοδος και η κάθοδος βρίσκονται σε κάποια απόσταση και έρχονται σε επαφή μέσω των αγωγών με τους οποίους συνδέονται με τη πηγή. Το κύκλωμα κλείνει με τα φωτοηλεκτρόνια που κινούνται στον κενό χώρο μεταξύ καθόδου-ανόδου. Επομένως μεταξύ της ανόδου και της καθόδου αναπτύσσεται και η τάση επαφής $(\phi_{\text{αν}} - \phi_{\text{καθ}})/e$ η οποία πρέπει να συνυπολογιστεί με την τάση που εφαρμόζεται από την πηγή τροφοδοσίας. Όταν λοιπόν μετράμε την τάση αποκοπής με ένα βολτόμετρο και τη βρίσκουμε ίση με $V_{\alpha\pi}$, τότε η πραγματική τάση που υπάρχει μεταξύ της ανόδου και της καθόδου δεν είναι η $V_{\alpha\pi}$ αλλά η τάση

$$V_{\alpha\pi} + \frac{\phi_{\text{αν}} - \phi_{\text{καθ}}}{e} \quad (1)$$

Στις φωτολυχνίες είναι $\phi_{\text{αν}} > \phi_{\text{καθ}}$.

Η τάση (1) επιβραδύνει τα ηλεκτρόνια, οπότε

$$K_{\text{max}} = eV_{\alpha\pi} + (\phi_{\text{αν}} - \phi_{\text{καθ}}) \quad (2)$$

Από τη φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein είναι:

$$K_{\text{max}} = hf - \phi_{\text{καθ}} \quad (3)$$

Συνδυάζοντας τις (2) και (3) παίρνουμε

$$eV_{\alpha\pi} = hf - \phi_{\text{αν}} \quad (4)$$

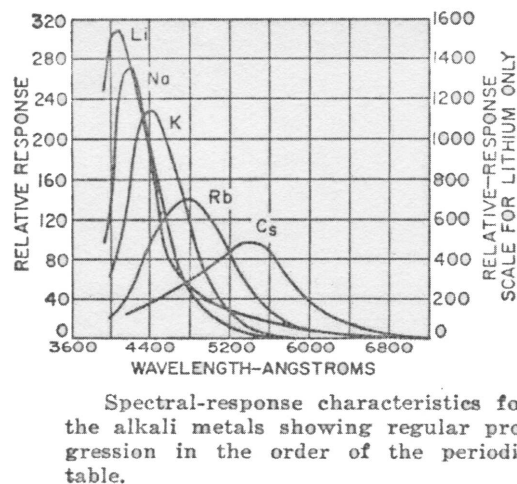
Παρατηρούμε ότι η εξίσωση του Einstein όταν εφαρμόζεται μόνο για την κάθοδο ισχύει κατά γνωστά, και σε αυτήν υπεισέρχεται το έργο εξαγωγής του μετάλλου της καθόδου. Όμως σε μια φωτολυχνία, όπου η άνοδος και η κάθοδος είναι διαφορετικά μέταλλα, ισχύει η σχέση (4) επειδή η τάση μεταξύ ανόδου-καθόδου είναι υπέρθεση της τάσης επαφής και της τάσης της πηγής. Δεν υπάρχει λοιπόν στη σχέση (4) κάτι παράδοξο ή λανθασμένο.

Πειραματικές μετρήσεις επιβεβαιώνουν πράγματι ότι εκείνο που υπολογίζουμε από την (4) είναι το έργο εξαγωγής του μετάλλου της ανόδου [1]. Μάλιστα ακριβείς μετρήσεις δείχνουν ότι για τάσεις ανόδου-καθόδου με ορθή πολικότητα υπάρχει μια τιμή «εκκίνησης» μετά από την οποία αρχίζει και υπάρχει φωτόρρευμα [1]. Κι αυτό γιατί πρέπει να υπερνικηθεί η τάση επαφής.

• Στο πείραμα που κάνουμε στο σχολικό εργαστήριο με τη συσκευή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου το έργο εξαγωγής που υπολογίζουμε από τη γραφική παράσταση $V_{\alpha\pi} - f$ προκύπτει μικρότερο από την αποδεκτή τιμή για το έργο εξαγωγής του Cs (1,95 eV) (σφάλμα $\sim 4\%$). Αυτό έρχεται σε αντίφαση με όσα είπαμε παραπάνω σύμφωνα με τα οποία θα έπρεπε να μετρήσουμε το έργο εξαγωγής της ανόδου, το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο έργο από εκείνο της καθόδου. Η εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι ότι η κάθοδος εξαχνώνεται και η εναπόθεση του υλικού στην επιφάνεια της ανόδου μειώνει το έργο εξαγωγής της κατά αρκετά eV [2].

2. Η απόδοση της φωτολυχνίας

Να αναφέρουμε ότι, αν και από ένα φωτόνιο μπορεί να παραχθεί ένα (και μόνο ένα) φωτοηλεκτρόνιο, δεν παράγουν όλα τα φωτόνια φωτοηλεκτρόνια. Υπάρχει ένα αδιάστατο μέγεθος, που ονομάζεται κβαντική απόδοση (quantum efficiency), το οποίο ισούται με το πλήθος των φωτοηλεκτρονίων διά του πλήθους των προσπίπτωντων φωτονίων. Η κβαντική απόδοση είναι πολύ μικρή, της τάξης των 10^{-5} έως 10^{-6} και εξαρτάται από το είδος του μετάλλου, την καθαρότητα της επιφάνειάς του και τη συχνότητα της ακτινοβολίας. Άρα για ορισμένη μεταλλική επιφάνεια και δεδομένη ένταση ακτινοβολίας (W/m^2), άλλος αριθμός φωτοηλεκτρονίων παράγεται για $\lambda = 630 \text{ nm}$ (κόκκινο) και άλλος για $\lambda = 450 \text{ nm}$ (μπλέ). Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται πως μεταβάλλεται η κβαντική απόδοση¹ σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας [6]. Οι μονάδες στον κατακόρυφο άξονα είναι ampere φωτορεύματος ανά watt προσπίπτουσας ακτινοβολίας.



Σχήμα 3

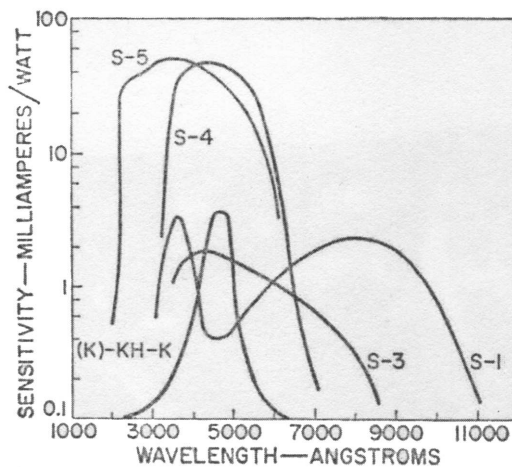
Μία ποιοτική ερμηνεία του παραπάνω διαγράμματος είναι η ακόλουθη [5]: καθώς το λ μειώνεται από μεγάλες τιμές η ενέργεια των φωτονίων αυξάνεται, με αποτέλεσμα να μπορούν να διαφύγουν από το μέταλλο και ηλεκτρόνια από χαμηλότερες ενεργειακές καταστάσεις. Συνεπώς

¹Στη βιβλιογραφία ο όρος quantum efficiency αναφέρεται και ως spectral response, spectral sensitivity, κ.ά

η απόδοση αυξάνεται. Όμως όταν το λ μειώνεται κάτω από μια ορισμένη τιμή η απόδοση αρχίζει μειώνεται. Κι αυτό γιατί για ορισμένη ενέργεια ακτινοβολίας U (Joules) ο αριθμός των φωτονίων της ακτινοβολίας (U/hf) μειώνεται, οπότε μειώνεται και ο αριθμός των φωτοηλεκτρονίων.

Πρακτικό ενδιαφέρον έχει το διάγραμμα του σχήματος 4 το οποίο δείχνει την απόδοση σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας για κάποιες φωτολυχνίες του εμπορίου [6]. Η φωτολυχνία S-4 έχει κάθοδο αντιμονίου-καισίου και εμφανίζει μέγιστη απόδοση σε $\lambda = 400\text{ nm}$. Η φωτολυχνία S-1 έχει κάθοδο οξειδίου του αργύρου-καισίου και παρουσιάζει ελάχιστη απόδοση σε $\lambda = 450\text{ nm}$. Στις φωτολυχνίες (K)-KH-K και S-3 η κάθοδος έχει επίστρωση καλίου και ρουβιδίου αντίστοιχα. Η φωτολυχνία S-5 έχει κάθοδο αντιμονίου-καισίου με περίβλημα κατασκευασμένο με ειδικό τύπο γυαλιού που επιτρέπει τη διέλευση υπεριώδους ακτινοβολίας κάτω από 300 nm , κάτι που δεν συμβαίνει για τις υπόλοιπες φωτολυχνίες.

• Στο πείραμα που κάνουμε στο σχολικό εργαστήριο με τη συσκευή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου η μικρή ένταση φωτορεύματος που μετράμε με μηδενική τάση αποκοπής για $\lambda = 450\text{ nm}$, σε σχέση με τις αντίστοιχες εντάσεις στα υπόλοιπα μήκη κύματος, πιθανόν να οφείλεται στην πολύ μικρή απόδοση που παρουσιάζει το φαινόμενο (ή η φωτολυχνία) γύρω από αυτό το μήκος κύματος.



Spectral response characteristics of vacuum phototubes: (K) - KH - K; S-1; S-3; S-4; S-5.

Σχήμα 4

3. Συμπέρασμα

Το πείραμα του φωτοηλεκτρικού φαινομένου είναι ένα δύσκολο στην ερμηνεία του πείραμα όταν κανείς θέλει να υπεισέλθει σε λεπτομέρειες. Αν περιοριστούμε στον προσδιορισμό του πηλίκου h/e , τότε η ανάλυση είναι εύκολη. Όταν όμως τίθενται ερωτήσεις ή απορίες σχετικά με μετρήσεις τότε μπορούμε να δώσουμε σαφείς εξηγήσεις μόνο αν γνωρίζουμε παραμέτρους που αφορούν ειδικά την πειραματική διάταξη που χειριζόμαστε, όπως για παράδειγμα τη φωτεινή ισχύ των πηγών LED, τη φασματική απόκριση της φωτολυχνίας κ.ά.

Αναφορές

- [1] Darren Wong¹, Paul Lee¹, et. al. The photoelectric effect: experimental confirmation concerning a widespread misconception in the theory, IOP 2011
- [2] Εμμ. Δρης Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, 2023
- [3] Ελευθ. Ηλιόπουλος, Προχωρημένα Εργαστήρια Φυσικής Ι, Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, Πανεπιστήμιο Κρήτης, Τμήμα Φυσικής
- [4] Millman & Halkias, Electronic devices and circuits
- [5] Millman & Halkias, Electronic devices and circuits, σελ. 571
- [6] RCA, Phototubes and photocells, Technical manual, Radio Corporation of America, 1963