

### Λαμπάκια LED και φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Εκτελούμε το πείραμα παρατήρησης φωτοηλεκτρικού φαινομένου στο εργαστήριο, χρησιμοποιώντας ως φωτεινή πηγή μονοχρωματικού φωτός λάμπες LED, οι οποίες εκπέμπουν μήκη κύματος, που φαίνονται στον διπλανό πίνακα.

Πηγή LED -Χρώμα	$\lambda$ (nm)
<b>Ερυθρό</b>	620
<b>Πορτοκαλί</b>	586
<b>Πράσινο</b>	530
<b>Μπλε</b>	485

Η φωτοκάθοδος της συσκευής είναι από Cs (καίσιο), που έχει έργο εξαγωγής  $\varphi = 2,87 \cdot 10^{-19} \text{J}$ .

**α)** Θεωρώντας γνωστή τη σχέση  $E_{ph} = 1242(eV \cdot nm) / \lambda(nm)$ , εξετάστε ποιες από τις λάμπες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή φωτοηλεκτρονίων.

**β)** Χρησιμοποιώντας τις λάμπες που βρήκατε στο ερώτημα (α) συμπληρώστε τον παρακάτω πίνακα:

Πηγή Led -Χρώμα	$\lambda$ (nm)	$f$ (* $10^{14}$ Hz)	$E_{ph}$ (eV)	$K_{max}$ (eV)	$V_0$ (V)

Δίνεται η ταχύτητα φωτός στο κενό ή αέρα  $c = 3 \cdot 10^8 \text{m/s}$ .

**γ)** Να κάνετε τη γραφική παράσταση  $K_{max} \rightarrow f$  σε βαθμολογημένους άξονες, θεωρώντας ότι είναι ευθεία. Με τη βοήθεια της γραφικής παράστασης υπολογίστε τη σταθερά του Planck και το σχετικό σφάλμα μέτρησης, αν η τιμή της σταθεράς είναι  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ .

**δ)** Χρησιμοποιώντας τη μπλε λάμπα, πλησιάζουμε τη φωτεινή πηγή στη μισή απόσταση (από  $d$  σε  $d/2$ ), σε σχέση με αυτή που βρισκόταν ως τώρα.

**δ1)** Τι θα συμβεί με τη φωτονική ροή πάνω στην κάθοδο;

**δ2)** Να κάνετε ποιοτική γραφική παράσταση της έντασης του φωτορεύματος  $i$  σε συνάρτηση με την τάση  $V_{AK}$  (ανόδου - καθόδου), πριν και μετά το πλησίασμα της φωτεινής πηγής. Υποθέτουμε ότι κάθε φωτόνιο εξάγει ένα ηλεκτρόνιο.

**ε)** Να κάνετε ποιοτική γραφική παράσταση της έντασης του φωτορεύματος  $i$  σε συνάρτηση με την τάση  $V_{AK}$  (ανόδου - καθόδου), για την κόκκινη και τη μπλε λάμπα τοποθετημένες στην ίδια απόσταση από τη φωτοκάθοδο. Υποθέτουμε ότι κάθε φωτόνιο εξάγει ένα ηλεκτρόνιο.

### Απάντηση

α) Το έργο εξαγωγής του Cs είναι 
$$\varphi = \frac{2,87 \cdot 10^{-19} \text{J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{J} / eV} = 1,79 eV$$

Οι ενέργειες των φωτονίων που εκπέμπουν οι λαμπτήρες LED είναι για κάθε χρώμα:

Ερυθρό: 
$$E_{ph} = \frac{1242}{620} = 2 eV$$

Πορτοκαλί: 
$$E_{ph} = \frac{1242}{586} = 2,12 eV$$

Πράσινο:  $E_{ph} = \frac{1242}{530} = 2,34 eV$

Μπλε:  $E_{ph} = \frac{1242}{485} = 2,56 eV$

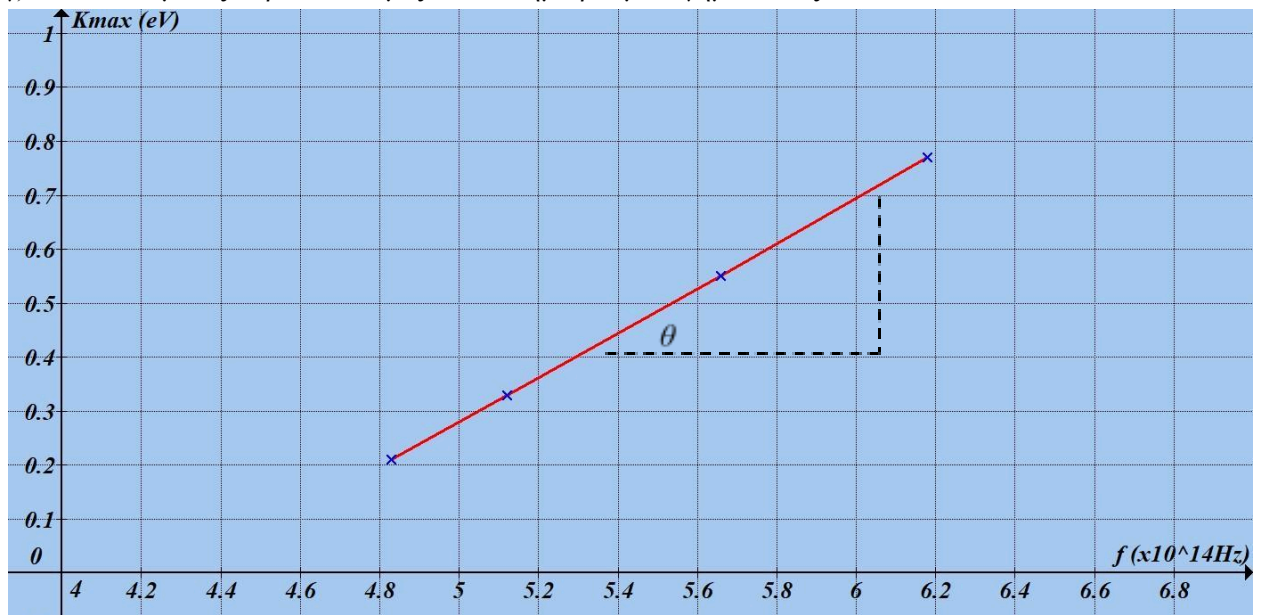
Παρατηρούμε ότι όλες οι λάμπες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εξαγωγή φωτοηλεκτρονίων.

β) Μπορούμε να συμπληρώσουμε τον πίνακα λαμβάνοντας υπόψη ότι:

- Η συχνότητα προκύπτει από τη σχέση  $f = \frac{c}{\lambda} \Leftrightarrow f = \frac{3 \cdot 10^8}{\lambda} \text{ Hz}$
- Η μέγιστη κινητική ενέργεια του εξερχόμενου φωτοηλεκτρονίου βρίσκεται από τη φωτοηλεκτρική εξίσωση Einstein  $K_{max} = E_{ph} - \phi$
- Η τάση αποκοπής είναι εκείνη για την οποία αποκόπτουμε τα πιο κινητικά ηλεκτρόνια δηλαδή  $K_{max} = eV_0$  ή  $V_0 = K_{max}/e$

Πηγή Led -Χρώμα	$\lambda$ (nm)	$f$ (* $10^{14}$ Hz)	$E_{ph}$ (eV)	$K_{max}$ (eV)	$V_0$ (V)
Ερυθρό	620	4,83	2,00	0,21	0,21
Πορτοκαλί	586	5,12	2,12	0,33	0,33
Πράσινο	530	5,66	2,34	0,55	0,55
Μπλε	485	6,18	2,56	0,77	0,77

γ) Τοποθετούμε τις παραπάνω τιμές σε σύστημα βαθμολογημένων αξόνων.



Σύμφωνα με τη φωτοηλεκτρική εξίσωση Einstein, η γραφική παράσταση είναι γραμμική

συνάρτηση, της μορφής  $K_{max} = hf - \phi$

Η κλίση της ευθείας πρέπει να ισούται με τη σταθερά του Planck:

$$\varepsilon_{\text{φθ}} = h = \frac{\Delta K_{\text{max}}}{\Delta f} = \frac{(0,7 - 0,4) \text{ eV} / 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ eV} / \text{J}}{(6 - 5,3) \cdot 10^{14}} = 6,86 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

Το σχετικό σφάλμα είναι

$$\sigma = \frac{6,86 \cdot 10^{-34} \text{ Js} - 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}} \cdot 100\% = 3,5\%$$

δ)

**δ1)** Αν  $d$  η απόσταση της φωτεινής πηγής από τη φωτοκάθοδο, η εκπεμπόμενη ισχύς κατανέμεται σε μια σφαιρική επιφάνεια ακτίνας  $d$ . Σε κάθε σημείο αυτής της επιφάνειας, η ένταση της ακτινοβολίας είναι:

$$\begin{aligned} I &= \frac{P_{\text{πηγ}}}{A_{\text{σφ}}} \Leftrightarrow I = \frac{\frac{dW_{\text{πηγ}}}{dt}}{4\pi d^2} \Leftrightarrow \\ I &= \frac{\frac{dN_{\text{πηγ}} \cdot hf}{dt}}{4\pi d^2} \Leftrightarrow I = \frac{dN_{\text{πηγ}}}{dt} \cdot \frac{hf}{4\pi d^2} \Leftrightarrow \\ \frac{dN_{\text{πηγ}}}{dt} &= \frac{I \cdot 4\pi d^2}{hf} \Leftrightarrow \\ n_{\text{πηγ}} &= \frac{I \cdot 4\pi d^2}{hf} \quad (1) \end{aligned}$$

όπου  $n_{\text{πηγ}} = \frac{dN_{\text{πηγ}}}{dt}$  ο ρυθμός εκπομπής φωτονίων από την μπλε λάμπα.

Αν το εμβαδό της καθόδου είναι  $A_{\text{καθ}}$  η ένταση είναι η ίδια, αλλά ο ρυθμός προσπιπτόντων φωτονίων, που της αναλογούν είναι (εργαζόμενοι όπως πριν):

$$n_{\text{καθ}} = \frac{I \cdot A_{\text{καθ}}}{hf} \quad (2)$$

Από τις (1), (2)  $\frac{n_{\text{καθ}}}{n_{\text{πηγ}}} = \frac{A_{\text{καθ}}}{4\pi d^2} \Leftrightarrow n_{\text{καθ}} = n_{\text{πηγ}} \cdot \frac{A_{\text{καθ}}}{4\pi d^2} \quad (3)$

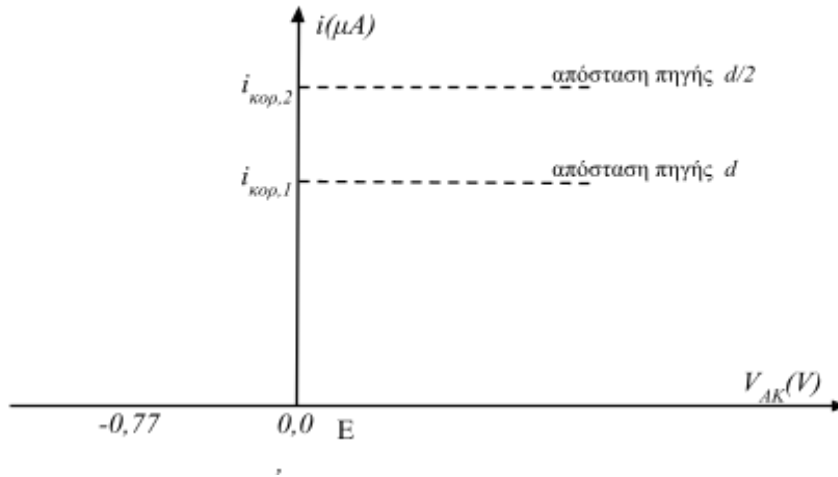
Αν μειώσουμε την απόσταση στο μισό, προφανώς η φωτονική ροή στην κάθοδο σύμφωνα με τη σχέση (3), τετραπλασιάζεται (θεωρητικά πάντα).

**δ2)** Αφού υποθέσαμε ότι κάθε φωτόνιο μπορεί να εξάγει ένα ηλεκτρόνιο, όταν υποδιπλασιάσαμε την απόσταση, αυξήσαμε τη φωτονική ροή  $n_{\text{καθ}}$  στην κάθοδο.

Τότε όμως θα έχουμε μεγαλύτερη τιμή στο αντίστοιχο φωτορεύμα, για κάθε τιμή της τάσης ανόδου-καθόδου και προφανώς και στο αντίστοιχο ρεύμα κόρου.

Η τάση αποκοπής παραμένει σταθερή, αφού εξαρτάται από τη συχνότητα της ακτινοβολίας και το υλικό της φωτοκαθόδου.

Το ζητούμενο διάγραμμα θα είναι:



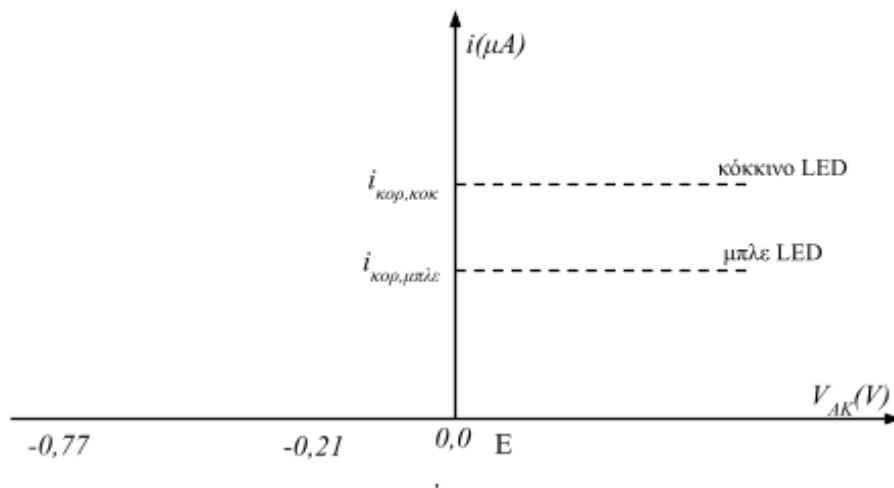
ε) Οι δύο φωτεινές πηγές έχουν την ίδια ένταση.

Η εξίσωση (2), για το μπλε και το κόκκινο φως αντίστοιχα δίνει

$$\left. \begin{aligned} n_{\text{μπλε,καθ}} &= \frac{I \cdot A_{\text{καθ}}}{hf_{\text{μπλε}}} \\ n_{\text{κόκ,καθ}} &= \frac{I \cdot A_{\text{καθ}}}{hf_{\text{κόκ}}} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow \frac{n_{\text{μπλε,καθ}}}{n_{\text{κόκ,καθ}}} = \frac{f_{\text{κόκ}}}{f_{\text{μπλε}}} \xrightarrow{f_{\text{κόκ}} < f_{\text{μπλε}}} n_{\text{μπλε,καθ}} < n_{\text{κόκ,καθ}}$$

Αυτό εξηγείται και ποιοτικά καθώς τα «μπλε φωτόνια» έχουν περισσότερη ενέργεια από τα «κόκκινα φωτόνια», άρα χρειάζονται λιγότερα μπλε για να μεταφέρουν συγκεκριμένο ποσό ενέργειας.

Αφού υποθέσαμε ότι κάθε φωτόνιο μπορεί να εξάγει ένα ηλεκτρόνιο, το ζητούμενο διάγραμμα θα είναι:



Παρατηρούμε και τις διαφορετικές τάσεις αποκοπής...

### Σχόλιο

Στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο:

- Η ένταση της (μονοχρωματικής) ακτινοβολίας καθορίζει το πλήθος φωτονίων που φτάνουν στο μέταλλο ανά δευτερόλεπτο.
- Η συχνότητα της ακτινοβολίας καθορίζει την ενέργεια κάθε φωτονίου και την κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων.
- Το ρεύμα κόρου εξαρτάται από το πλήθος των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων, δηλαδή ουσιαστικά από το πλήθος φωτονίων που φτάνουν (υποθέτοντας ότι κάθε φωτόνιο δίνει ηλεκτρόνιο), δηλαδή από την ένταση της ακτινοβολίας.

**Ανδρέας Ριζόπουλος**