

« Διερεύνηση του Φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Υπολογισμός του έργου εξαγωγής ηλεκτρονίων για το νάτριο »

« Investigation of the photoelectric effect. Calculation of electron work function for sodium »

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ

ΣΑΧΙΝΙΔΗΣ ΣΥΜΕΩΝ
Καθηγητής Φυσικός

Sachinidis Simeon
Physical Professor

Περίληψη

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι το φαινόμενο κατά το οποίο μια μεταλλική επιφάνεια απελευθερώνει ηλεκτρόνια στο περιβάλλον όταν πάνω της προσπίπτει φως. Είναι το φαινόμενο αλληλεπίδρασης μεταξύ ακτινοβολίας και ύλης, το οποίο χαρακτηρίζεται από την απορρόφηση φωτονίων και τη απελευθέρωση ηλεκτρονίων.

Ο σκοπός της εργασίας μου είναι η διερεύνηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου σε θεωρητικό επίπεδο και η επαλήθευση των νόμων του φωτοηλεκτρικού φαινομένου με άλλα υλικά όπως του νατρίου και ασβεστίου στην κάθοδο. Υπολογισμός του έργου φωτοεξαγωγής των ηλεκτρονίων με κάθοδο νατρίου.

Λέξεις κλειδιά: Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, τάση αποκοπής, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, μήκος κύματος.

ABSTRACT

The photoelectric effect is a phenomenon in which a metal surface releases electrons to the environment where light is incident thereon.

It is the phenomenon of interaction between radiation and matter, which is characterized by photon absorption and the subsequent release of electrons.

The purpose of my work is to investigate the photoelectric effect in theory and verification of laws of photoelectric effect with other materials such as sodium and calcium at the cathode. Calculation of the electron work function cathode with sodium.

Keywords: Photoelectric effect, Stopping potential, electromagnetic radiation, wavelength.

Εισαγωγή

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι το φαινόμενο κατά το οποίο μια μεταλλική επιφάνεια απελευθερώνει ηλεκτρόνια στο περιβάλλον όταν πάνω της προσπίπτει φως.

Είναι το φαινόμενο αλληλεπίδρασης μεταξύ ακτινοβολίας και ύλης, το οποίο χαρακτηρίζεται από την απορρόφηση φωτονίων και τη συνακόλουθη απελευθέρωση ηλεκτρονίων. Ειδικότερα μπορούμε να πούμε ότι το **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** είναι μια κβαντική διεργασία κατά την οποία απελευθερώνονται ηλεκτρόνια από μια επιφάνεια αγωγού όταν προσπέσει σε αυτή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συχνότητας τέτοιας ώστε τα ηλεκτρόνια να κατορθώσουν να υπερπηδήσουν το φράγμα δυναμικής ενέργειας που τα συγκρατεί στην επιφάνεια αυτή. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα.

Κυρίως θέμα

A. Ιστορική αναδρομή. Αδυναμία της κλασικής φυσικής να ερμηνεύσει το φαινόμενο.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον Hertz το 1887, κατά την διάρκεια των πειραμάτων του για την διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Παρατήρησε, ότι εύκολα εμφανιζόταν σπινθήρας στο διάκενο μεταξύ δύο ακροδεκτών αν αυτοί φωτιζόντουσαν με φως παρά όταν οι ακροδέκτες ήταν σε σκότος. Παρατήρησε επίσης ότι ο αρνητικός ακροδέκτης ήταν πιο ευαίσθητος από τον θετικό ακροδέκτη.

Το Μάρτιο του 1905 συνέβη μια σπουδαία εξέλιξη στην κβαντική θεωρία. Ο Α. Einstein σε μία από τις τρεις του δημοσιεύσεις με τίτλο «μια ερευνητική άποψη για την παραγωγή και τους μετασχηματισμούς του φωτός» διατύπωσε τη θεωρία των κβάντων φωτός και εξήγησε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Σύμφωνα με τον Einstein, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία όχι μόνο απορροφάται και εκπέμπεται κατά κβάντα αλλά και διαδίδεται στο χώρο κατά κβάντα. Με αυτή του την δημοσίευση διασταύρωσε τα ξίφη του με τον Maxwell και αμφισβήτησε τη μέχρι τότε εντυπωσιακή επιτυχία της κυματικής θεωρίας του φωτός.

Η διαφωνία μεταξύ της κλασικής φυσικής και νεότερης φυσικής βρισκόταν στο σημείο αυτό.

1. Σύμφωνα με την Κλασική Φυσική τα ηλεκτρόνια θα μπορούσαν να απελευθερωθούν απορροφώντας αθροιστικά την ενέργεια της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτά. Η απελευθέρωση των ηλεκτρονίων θα απαιτούσε τον φωτισμό του μετάλλου για κάποιο χρονικό διάστημα.

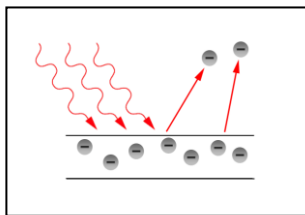
2. Η μέγιστη κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων θα έπρεπε να είναι ανάλογη της έντασης της ακτινοβολίας, δηλαδή της ποσότητας της ακτινοβολίας την οποία δέχεται το μέταλλο.

Σημείο που θα πρέπει να τονιστεί. Σύμφωνα με το (1) δεν μπορεί να συμβεί γιατί από την στιγμή που φωτίζεται η μεταλλική πλάκα, εκπέμπονται ακαριαία ηλεκτρόνια (χρόνος μικρότερο του 10^{-9} sec. Σύμφωνα με το (2) η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που αποσπώνται από την μεταλλική πλάκα είναι ανάλογη της

συχνότητας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και όχι της έντασης της ακτινοβολίας. (Ερευνα του Φίλιπ Λέναρντ).

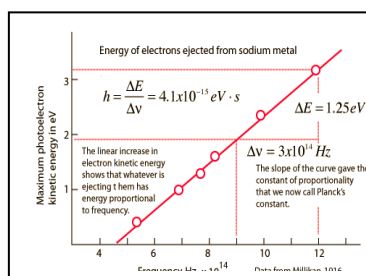
Σύμφωνα με τον Αϊνστάιν: υπέθεσε ότι η ενέργεια ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος μεταφέρεται στην μεταλλική πλάκα σε διακριτές ποσότητες (φωτόνια). Κάθε φωτόνιο, όταν δίνει την ενέργειά του, τη δίνει ολόκληρη και μόνο σε ένα ηλεκτρόνιο κάθε φορά. Εάν η ενέργεια του φωτονίου είναι αρκετή το ηλεκτρόνιο θα αποσπασθεί από το άτομο του μετάλλου. Εάν όμως το φωτόνιο δεν έχει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια, τότε το φωτόνιο δεν απορροφάται και το ηλεκτρόνιο θα παραμείνει στην τροχιά του ασχέτως με το πόσο ισχυρή είναι η φωτεινή ακτινοβολία (δηλαδή το φως).

Β. Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι μια κβαντική διεργασία κατά την οποία απελευθερώνονται ηλεκτρόνια από μια επιφάνεια αγωγού όταν προσπέσει σε αυτή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία *συχνότητας* τέτοιας ώστε τα ηλεκτρόνια να κατορθώσουν να υπερπηδήσουν το φράγμα δυναμικής ενέργειας που τα συγκρατεί στην επιφάνεια αυτή. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα. (Ιντερνετ.1).

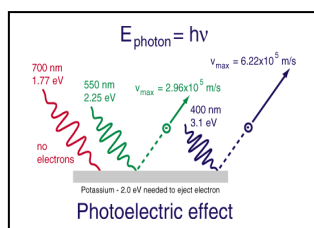


Εικόνα 1. Εξαγωγή φωτοηλεκτρονίων.

Τα ηλεκτρόνια που υπάρχουν στο εσωτερικό ενός μετάλλου περιορίζονται στο χώρο που καταλαμβάνει ο αγωγός, από δυνάμεις που εμποδίζουν τη διάχυσή τους στο περιβάλλον. Όταν μια δέσμη φωτός προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου κάποια ηλεκτρόνια απορροφούν ενέργεια αρκετή για να υπερνικήσουν αυτές τις δυνάμεις και βγαίνουν από το μέταλλο (φωτοηλεκτρόνια). Εικόνες 2,3.

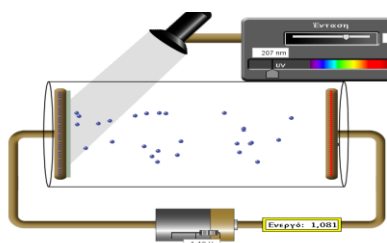


Εικόνα 2. Συνθήκη για διαφυγή ηλεκτρονίων από το μέταλλο.



Εικόνα 3. Παραδείγματα τιμών ενέργειας για την δημιουργία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

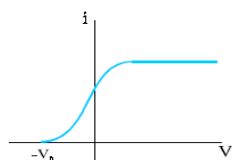
Για τη μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου θα χρησιμοποιήσω τη διάταξη του σχήματος 1.



Σχήμα 1. Λογισμικό: <http://phet.colorado.edu/el/simulation/photoelectric>.

Μέσα σε ένα σωλήνα υψηλού κενού (10^{-7} atm) υπάρχουν δύο πλάκες. Η πρώτη, που χρησιμεύει ως **κάθοδος**, έχει μεγάλη επιφάνεια, φέρει επίστρωση από ένα αλκαλιμέταλλο (Na) και όταν φωτίζεται εκπέμπει ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά έλκονται και συλλέγονται από την δεύτερη πλάκα, την **άνοδο**. Με τη βοήθεια μιας ποτενσιομετρικής διάταξης μπορούμε να μεταβάλλουμε την τάση που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια. Τέλος με ένα μικροαμπερόμετρο που παρεμβάλλεται στο κύκλωμα μπορούμε να μετρήσουμε την ένταση του ρεύματος που οφείλεται στα ηλεκτρόνια που εκπέμπει η φωτιζόμενη κάθοδος, (ροή ηλεκτρονίων). Όταν η κάθοδος φωτίζεται εκπέμπει ηλεκτρόνια (φωτοηλεκτρόνια) τα οποία επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των ηλεκτροδίων και καταλήγουν στην άνοδο.(ιντερνετ 3).

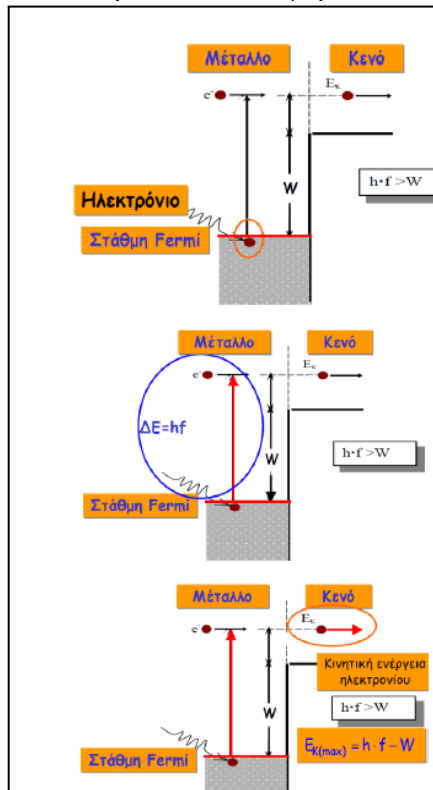
Το διάγραμμα 1 παριστάνει την ένταση του ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση μεταξύ ανόδου καθόδου στο κύκλωμα του σχήματος. Παρατηρούμε ότι για τάση μηδέν έχουμε ρεύμα, που σημαίνει ότι τα φωτοηλεκτρόνια εξέρχονται από την κάθοδο με κινητική ενέργεια που τα επιτρέπει να κινηθούν μέχρι την άνοδο. Ρεύμα έχουμε και για τάσεις λίγο μικρότερες από το μηδέν.



Διάγραμμα 1. Διάγραμμα της έντασης του ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση.

Τάση αρνητική, εδώ, σημαίνει ότι η άνοδος έχει μικρότερο δυναμικό από την κάθοδο. Στην περίπτωση αυτή το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ ανόδου - καθόδου παρεμποδίζει τα ηλεκτρόνια που εξέρχονται από την κάθοδο να φτάσουν στην άνοδο. Εφόσον για κάποιες αρνητικές τιμές της τάσης έχουμε ρεύμα, η κινητική ενέργεια ορισμένων ηλεκτρονίων, όταν εξέρχονται από την κάθοδο, είναι αρκετά μεγάλη ώστε να υπερνικήσουν το αντιτιθέμενο ηλεκτρικό πεδίο και να φτάσουν στην άνοδο. Η τάση στην οποία διακόπτεται το ρεύμα ονομάζεται **τάση αποκοπής**.

Το φαινόμενο δε μπορεί να εξηγηθεί μόνο από το γεγονός ότι το φως είναι ηλεκτρομαγνητικό κύμα. **Αποτελείται από μικρά πακέτα ενέργειας, που ονομάζονται κβάντα φωτός ή φωτόνια.** Ο Αϊνστάιν 1905, επεκτείνοντας τις απόψεις του Planck, θεώρησε ότι κάθε φωτόνιο, όταν δίνει την ενέργειά του, τη δίνει ολόκληρη και μόνο σε ένα ηλεκτρόνιο κάθε φορά. Αν αυτή είναι αρκετή για να αντισταθμίσει την έλξη που δέχεται το ηλεκτρόνιο από τον πυρήνα, το ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται. Διαφορετικά, εκπέμπει την ακτινοβολία που απορροφήθηκε στο



περιβάλλον. Το τελευταίο εξηγεί γιατί αν η ακτινοβολία έχει συχνότητα μικρότερη της συχνότητας κατωφλίου, το μέταλλο δεν φορτίζεται, όσο και αν το φωτίσουμε. Για να υπερνικήσει τις δυνάμεις που το συγκρατούν στο μέταλλο ένα ηλεκτρόνιο πρέπει να προσλάβει ένα ελάχιστο ποσό ενέργειας. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται **έργο εξαγωγής** και συμβολίζεται $W_{εξ}$, που ποικίλει από μέταλλο σε μέταλλο. Το φως, ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα, μεταφέρει ενέργεια, επομένως, είναι αναμενόμενο ότι τα ηλεκτρόνια κάποιου μετάλλου μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια από το φως και να εξέλθουν από το μέταλλο.

Σύμφωνα με την θεωρία του Αϊνστάιν: Η ενέργεια κάθε φωτονίου είναι $E = h \cdot f$. Όπου f η συχνότητά του και h η σταθερά του Planck. Κάθε φωτόνιο της δέσμης που φωτίζει την κάθοδο μεταδίδει όλη του την ενέργεια σε ένα μόνο από τα ηλεκτρόνια του μετάλλου. Εικόνα 4.

Εικόνα 4. Διαδικασία εξαγωγή ηλεκτρονίου από μέταλλο. (Ιντερνετ 2).

Αν η ενέργεια του φωτονίου είναι μικρότερη από το έργο εξαγωγής, το ηλεκτρόνιο δε μπορεί να εγκαταλείψει το μέταλλο. Εάν είναι μεγαλύτερη ή ίση με το έργο εξαγωγής το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το μέταλλο με κινητική ενέργεια που υπολογίζεται από τη σχέση. (Ιντερνετ 4).

$$E_K = \frac{1}{2} m v^2 = h \cdot f - W_{εξ} \quad \text{Η φωτοηλεκτρική εξίσωση του Αϊνστάιν.}$$

Για να εξέλθει ένα ηλεκτρόνιο από το μέταλλο, πρέπει $h \cdot f - W_{εξ} \geq 0$ δηλαδή η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου να είναι μεγαλύτερη ή οριακά ίση με το έργο εξαγωγής $f \geq \frac{W_{εξ}}{h}$.

Η συχνότητα f_0 είναι η **συχνότητα κατωφλίου**. $f_0 \geq \frac{W_{εξ}}{h}$

Γ. Νόμοι του Φωτοηλεκτρικού φαινομένου

Το φαινόμενο οφείλεται στην εκπομπή *αρνητικών φορτισμένων σωμάτων* (Hallwachs 1889).

Τα εκπεμπόμενα σώματα είναι ηλεκτρόνια (Lenard και J.J. Thomson 1889).

Τα εκπεμπόμενα σώματα αποσπώνται λόγω του προσπίπτοντος φωτός (Hallwachs κ.α. 1889).

Υπάρχει στενή σχέση μεταξύ του δυναμικού επαφής ενός μετάλλου και της φωτοευαισθησίας (Elster και Geitel 1889).

1. Η εκπομπή φωτοηλεκτρονίων από το μέταλλο γίνεται σχεδόν ταυτόχρονα με το φωτισμό της επιφάνειάς του (για την ακρίβεια ο χρόνος από το φωτισμό του μετάλλου μέχρι την εκπομπή φωτοηλεκτρονίων είναι μικρότερος του 10^{-9} s).

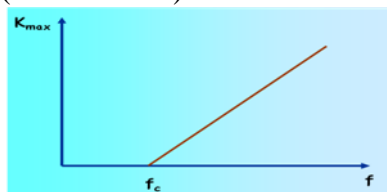
Αν η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από τη συχνότητα κατωφλίου η αύξηση της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας συνεπάγεται αύξηση του αριθμού των φωτονίων που πέφτουν στην κάθοδο ανά μονάδα χρόνου και επομένως αύξηση του αριθμού των φωτοηλεκτρονίων που εξέρχονται από το μέταλλο στον ίδιο χρόνο. Τέλος όπως φαίνεται από τη φωτοηλεκτρική εξίσωση, η κινητική ενέργεια με την οποία εξέρχονται τα ηλεκτρόνια από κάποιο μέταλλο εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και όχι από την ένταση.

2. Ο ρυθμός εκπομπής ηλεκτρονίων είναι ανάλογος της έντασης του φωτός. (Elster και Geitel 1891).

3. Η μέγιστη κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων δεν εξαρτάται από την ένταση του φωτός.

4. Η εκπομπή των ηλεκτρονίων είναι ουσιαστικά ακαριαία ανεξάρτητα από την ένταση του προσπίπτοντος φωτός. Με άλλα λόγια περισσότερο φως εκδιώκει περισσότερα ηλεκτρόνια με την ίδια κινητική ενέργεια. Η μέγιστη κινητική ενέργεια με την οποία τα φωτοηλεκτρόνια εγκαταλείπουν το μέταλλο είναι Γραμμική συνάρτηση της συχνότητας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, εξαρτάται από το έργο εξαγωγής του μετάλλου αλλά είναι ανεξάρτητη της έντασης της ακτινοβολίας. Διάγραμμα 2.

Τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια έχουν μέγιστη κινητική ενέργεια που είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος του φωτός και δεν εκπέμπονται ηλεκτρόνια αν το μήκος κύματος υπερβαίνει μία τιμή που καλείται κατώφλιο. (Lenard 1902).

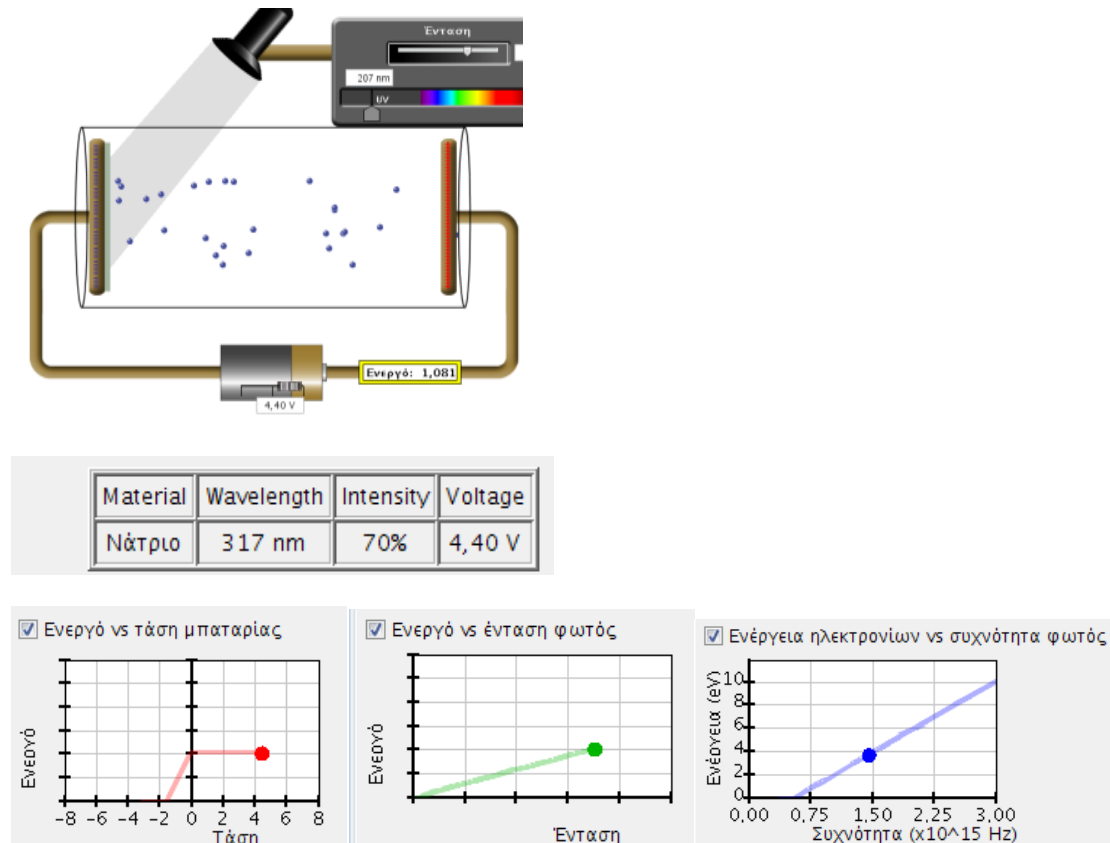


Διάγραμμα 2. Η μέγιστη κινητική ενέργεια με την οποία τα φωτοηλεκτρόνια εγκαταλείπουν το μέταλλο είναι Γραμμική συνάρτηση της συχνότητας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

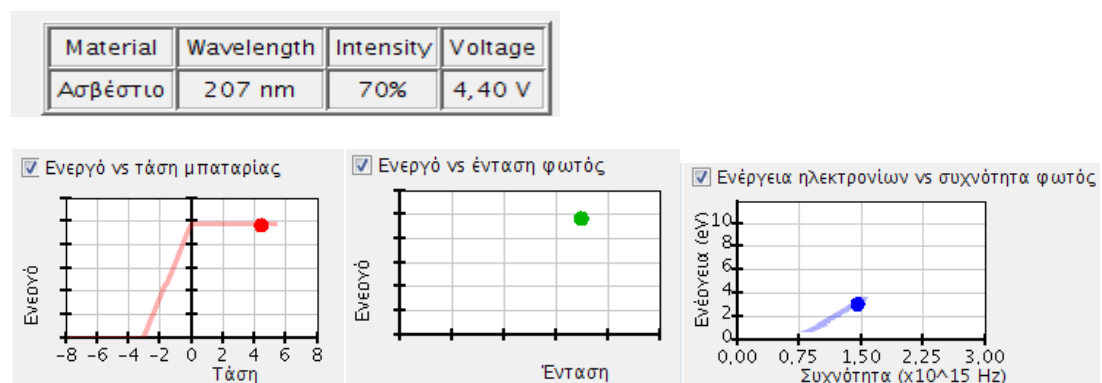
Δ. Πειραματικό μέρος

Αντικατέστησα την κάθοδο με άλλη επιφάνεια από επίστρωση Νατρίου και στην συνέχεια με άλλη ασβεστίου. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα θεωρητικά δεδομένα.

Για το Νάτριο



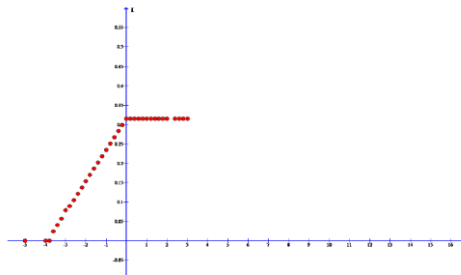
Για το Ασβέστιο



Ειδικότερα για το νάτριο στην κάθοδο οι μετρήσεις έδωσαν:

Η πρώτες στήλες αναφέρονται σε Τάση και οι δεύτερες σε Ρεύμα

-8	0	-1,2	0,218
-7	0	-1	0,234
-6	0	-0,8	0,251
-5	0	-0,6	0,267
-4	0	-0,4	0,283
-3,8	0	-0,2	0,299
-3,6	0,024	0	0,315
-3,4	0,04	0,2	0,315
-3,2	0,057	0,4	0,315
-3	0,079	0,6	0,315
-2,8	0,089	0,8	0,315
-2,6	0,105	1	0,315
-2,4	0,121	1,2	0,315
-2,2	0,137	1,4	0,315
-2	0,154	1,6	0,315
-1,8	0,17	1,8	0,315
-1,6	0,186	2	0,315
-1,4	0,202	2,4	0,315
		2,4	0,315
		2,6	0,315
		2,8	0,315
		3	0,315



Υπολογισμός του έργου εξαγωγής

$$E_{K,iv} = e|V_{\alpha\pi\sigma\kappa}| = h \cdot f - W$$

$$W = h \cdot f - e|V_{\alpha\pi\sigma\kappa}|$$

$$\lambda = 200\text{nm} \quad f = \frac{C}{\lambda} = 1,5 \cdot 10^{15} \text{Hz}$$

$$|V_{\alpha\pi\sigma\kappa}| = 3,6 \text{Volt}$$

$$W = h \cdot f - e|V_{\alpha\pi\sigma\kappa}| = 9,93 \cdot 10^{-19} - 5,76 \cdot 10^{-19} = 4,17 \cdot 10^{-19} \text{J} = \frac{4,17 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,6 \text{eV}$$

Συγκρίνοντας την τιμή 2,6eV με τα θεωρητικά αποτελέσματα του πίνακα 1.

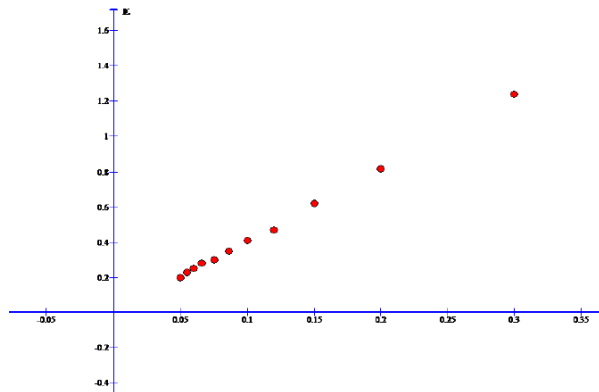
Στοιχείο	Έργο εξαγωγής σε [eV]
Αλουμίνιο	4.3
Ανθρακας	5.0
Αργυρος	4.3
Νάτριο	2.7
Νικέλιο	5.1
Πυρίτιο	4.8
Χαλκός	4.7
Χρυσός	5.1

Πίνακας 1. Θεωρητικές τιμές έργων εξαγωγής διαφόρων υλικών

Από τις άλλες μετρήσεις

Για τάση $V=1 \text{Volt}$

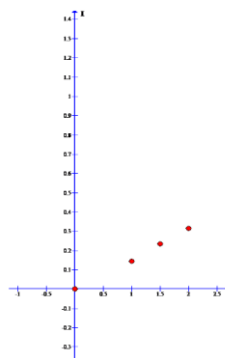
λ nm	f1016	E eV
100	0,3	1,24
150	0,2	0,82
200	0,15	0,62
250	0,12	0,47
300	0,1	0,41
350	0,086	0,35
400	0,075	0,3
450	0,066	0,28
500	0,06	0,25
550	0,055	0,23
600	0,05	0,2



Για τάση $V=1$ Volt

Ένταση	I ενεργός
0	0
1	0,144
1,5	0,235
2	0,315
3	0,472
4	0,63
5	0,798
6	0,956

$\lambda=200$ nm



Συμπέρασμα : Υπάρχει μια ταύτιση πειραματικών –θεωρητικών δεδομένων. Οι νόμοι του φωτοηλεκτρικού φαινομένου επαληθεύονται και στις δύο περιπτώσεις

Η μέγιστη κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων δεν εξαρτάται από την ένταση του φωτός

Η κινητική ενέργεια με την οποία εξέρχονται τα ηλεκτρόνια από κάποιο μέταλλο εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Ο ρυθμός εκπομπής ηλεκτρονίων είναι ανάλογος της έντασης του φωτός.

Η ένταση του ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση μεταξύ ανόδου καθόδου στο κύκλωμα του διαγράμματος 1. Παρατηρήστε ότι για τάση μηδέν έχουμε ρεύμα, που σημαίνει ότι τα φωτοηλεκτρόνια εξέρχονται από την κάθοδο με κινητική ενέργεια που τους επιτρέπει να κινηθούν μέχρι την άνοδο. Ρεύμα έχουμε και για τάσεις λίγο μικρότερες από το μηδέν.

Βιβλιογραφία.

1. Λογισμικό: <http://phet.colorado.edu/el/simulation/photoelectric>

2. Ίντερνετ. 1: http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CF%89%CF%84%CE%BF%CE%B7%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CF%86%CE%B1%CE%B9%CE%BD%CF%8C%CE%BC%CE%B5%CE%BD%CE%BF

BC%CE%B5%CE%BD%CE%BF

3. ιντερνετ2: http://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&sqi=2&ved=0CCwQFjAC&url=http%3A%2F%2Fwww.ucy.ac.cy%2Fphy%2Fdocuments%2Fphysics%2Fel-GR%2FPHOTOELECTRIC_EFFECT.ppt&ei=7BnjU-juKYmV0QWu8YGwBA&usg=AFQjCNFz7Sr1bRn2nD65VAkZ1vrkqX6nWw&bvm=bv.72676100.d.bGQ

4. ιντερνετ 3 <https://www.teicrete.gr/physics/lab/fdm/eppa/mk/fotohlektiko.pdf>

Ιντερνετ 4 http://www.physics.ntua.gr/~dris/FYS_G_LYK.PDF/F_FYGL285-.pdf

5. Σ. Τραχανάς, *Κβαντομηχανική Ι*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, **έκδοση 2005** (εγχειρίδιο μαθήματος).

6. R. Serway, *Physics for Scientists and Engineers, Τόμος 4, Σύγχρονη Φυσική*, Μετάφραση: Καθ. Λ. Ρεσβάνης.

7. R. Serway, C. Moses, C. Moyer, *Σύγχρονη Φυσική*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης