

ΠΕΙΡΑΜΑ FRANK-HERTZ

ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ ΕΝΟΣ ΑΤΟΜΟΥ

Η απορρόφηση ενέργειας από τα άτομα γίνεται ασυνεχώς και σε καθορισμένες ποσότητες. Λαμβάνοντας ένα άτομο ορισμένα ποσά ενέργειας κάποιο ηλεκτρόνιο του μεταπίπτει σε στοιβάδα υψηλότερης ενέργειας με διαφορά ίση με την ενέργεια που προσέλαβε. Με τη βοήθεια του πειράματος των Frank-Hertz που ακολουθεί δείξαμε το φαινόμενο αυτό και να προσδιορίσαμε την ενέργεια πρώτης διέγερσης ατόμων υδραργύρου (Hg) η οποία βρέθηκε $E_1=(4.98\pm 0.06)eV$ για αέριο ατμών υδραργύρου στους 200 °C.

Θεωρητική εισαγωγή

Η μεταβολή της ενεργειακής κατάστασης των ατόμων γίνεται ασυνεχώς σε καθορισμένες ποσότητες ενέργειας. Ο κυριότερος τρόπος μεταβολής της ενεργειακής κατάστασης είναι με εκπομπή ή απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Άλλοι τρόποι μεταβολής της ενέργειας των ατόμων είναι με κρούσεις μεταξύ τους, (όπως γίνεται για παράδειγμα με τη θερμική κίνηση του ίδιου του αερίου) ή με άλλα σωματίδια (για παράδειγμα με ηλεκτρόνια).

Τα άτομα στη συνηθισμένη τους κατάσταση (βασική κατάσταση) έχουν τη μικρότερη εσωτερική ενέργεια και αυτό τα καθιστά ενεργειακά σταθερά. Λαμβάνοντας ένα άτομο ορισμένα ποσά ενέργειας, κάποιο ηλεκτρόνιο του, πληρώνοντας μερικά κριτήρια επιλογής, μεταπίπτει σε στοιβάδα υψηλότερης ενέργειας με διαφορά ίση με την ενέργεια που προσέλαβε. Το άτομο λέμε τότε ότι βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση. Η κατάσταση αυτή δεν είναι σταθερή και για αυτό το ηλεκτρόνιο παραμένει εκεί σύντομο χρονικό διάστημα (της τάξης $10^{-8}sec$). Στη συνέχεια μεταπίπτει ξανά στην αρχική του κατάσταση εκπέμποντας ένα φωτόνιο ίσης ενέργειας με τη διαφορά των δύο ενεργειακών σταθμών σύμφωνα με τη σχέση :

$$\Delta E = hf \quad (1)$$

(όπου h είναι η σταθερά του Planck $h=4.136\cdot 10^{-21} MeV\cdot sec$ και f η συχνότητα του εκπεμπόμενου φωτονίου).

Τα φαινόμενα αυτά βρίσκουν πολλές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα στους λαμπτήρες φθορισμού, όπου άτομα αερίου διεγείρονται μετά από κρούσεις με ηλεκτρόνια και καθώς αποδιεγείρονται εκπέμπουν φωτεινή ακτινοβολία.

Η μελέτη του φαινομένου της απορρόφησης ενέργειας και της διέγερσης των ατόμων ενός στοιχείου με κρούσεις που υφίστανται κατά το βομβαρδισμό τους με ηλεκτρόνια δεδομένης ενέργειας έγινε από τους J.Franck και G.Hertz. Για το λόγο αυτό χρησιμοποίησαν μια πειραματική διάταξη που αποτελούνταν από ένα κανόνι ηλεκτρονίων υπό κενό για την παραγωγή λεπτής μονοενεργειακής δέσμης ηλεκτρονίων ελεύθερης από συγκρούσεις, ένα θάλαμο συγκρούσεων που περιείχε ευγενές αέριο σε χαμηλή πίεση ώστε να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα να συγκρουστεί κάποιο ηλεκτρόνιο περισσότερο από μια φορές και μια διάταξη για τη μέτρηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων που κατάφεραν να περάσουν το θάλαμο συγκρούσεων.

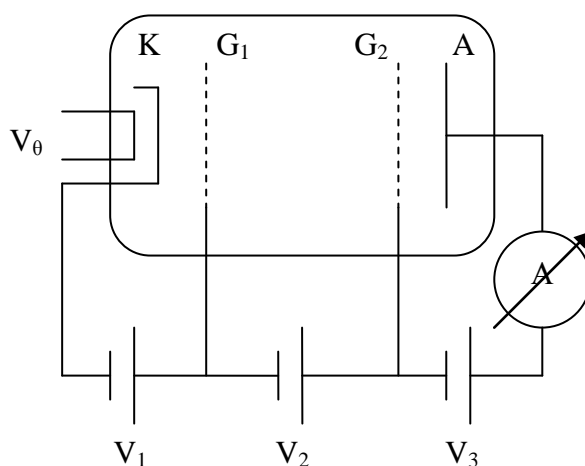
Το πείραμα έδειξε ότι τα ηλεκτρόνια με κινητική ενέργεια λίγα eV υφίστανται μόνο ελαστικές συγκρούσεις. Κατά τις συγκρούσεις αυτές τα ηλεκτρόνια λόγω της πολύ μικρότερης μάζας τους από αυτήν των ατόμων του αερίου χάνουν ελάχιστη κινητική ενέργεια. Καθώς η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που προέρχονται από το πυροβόλο αυξάνεται, οι κρούσεις παραμένουν ελαστικές μέχρι κάποιο κατώφλι E_1 , που είναι χαρακτηριστικό των ατόμων του αερίου του θαλάμου συγκρούσεων. Όταν η ενέργεια ξεπεράσει το κατώφλι E_1 ορισμένα ηλεκτρόνια, που εξέρχονται από το θάλαμο συγκρούσεων, έχουν μειωμένη κινητική ενέργεια κατά E_1 ενώ τα υπόλοιπα δεν έχουν σημαντική μείωση. Αυξάνοντας παραπάνω την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων παρατηρείται ένα δεύτερο κατώφλι E_2 σε υψηλότερη ενέργεια και το φαινόμενο συνεχίζεται και για υψηλότερες ενέργειες με κατώφλια $E_3, E_4 \dots$

Αποδείχθηκε έτσι ότι τα άτομα μπορούν να απορροφήσουν ορισμένα μόνο ποσά ενέργειας μεταβάλλοντας έτσι την ενεργειακή τους κατάσταση ασυνεχώς. Οι ενέργειες $E_1, E_2, E_3 \dots$ ονομάζονται κρίσιμα δυναμικά και είναι χαρακτηριστικές για κάθε άτομο. Οι διαφορές μεταξύ δύο διαδοχικών κρίσιμων δυναμικών μειώνονται σταδιακά μέχρι να μην είναι δυνατή η διάκρισή τους από την ανάλυση της ενέργειας των ηλεκτρονίων μετά το θάλαμο συγκρούσεων.

Την απορρόφηση ενέργειας με ασυνεχή τρόπο προσπαθήσαμε να αποδείξουμε προσδιορίζοντας συγχρόνως την πρώτη ενέργεια διέγερσης ατόμων υδραργύρου με το πείραμα που ακολουθεί.

Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήσαμε αποτελούνταν από μια τέτροδο λυχνία που περιείχε ατμούς υδραργύρου, ένα χώρο σταθερής θερμοκρασίας όπου ήταν τοποθετημένη η λυχνία, τροφοδοτικά για την πόλωση της λυχνίας και όργανα μέτρησης των τάσεων πόλωσης και του ανοδικού ρεύματος. Στο σχ.1 παρουσιάζεται η διάταξη που χρησιμοποιήσαμε.



Σχ. 1. Σχηματικό διάγραμμα της διάταξης της τέτροδου λυχνίας που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη του πειράματος Frank-Hertz.

Η διαφορά δυναμικού V_1 μεταξύ της καθόδου K και του πρώτου πλέγματος G_1 χρησίμευε για την αραίωση του νέφους ώστε να μην παρατηρείται αυτοτελής εκκένωση. Τα ηλεκτρόνια που παράγονταν στη θερμαινόμενη κάθοδο επιταχύνονταν στο χώρο μεταξύ των δύο πλεγμάτων G_1 - G_2 από τη διαφορά δυναμικού V_2 όπου και συγκρούονταν με τα άτομα των ατμών υδραργύρου. Με τη διαφορά δυναμικού V_3 μεταξύ του δεύτερου πλέγματος G_2 και της ανόδου A επιλέγαμε να μετρήσουμε μόνο τα ηλεκτρόνια που είχαν ενέργεια μεγαλύτερη από eV_3 . Αυτό που μας ενδιέφερε ήταν η μεταβολή του ανοδικού ρεύματος συναρτήσει του δυναμικού επιτάχυνσης.

Η μέτρηση του δυναμικού επιτάχυνσης γινόταν με ηλεκτρονικό βολτόμετρο με ακρίβεια 0.1 V. Η μέτρηση του ανοδικού ρεύματος γινόταν με ηλεκτρονικό αμπερόμετρο στην κλίμακα των nA και με ακρίβεια 0.01 nA. Η συσκευή ελέγχου διέθετε και έξοδο τάσης ανάλογης του ανοδικού ρεύματος, η οποία ήταν συνδεδεμένη

στην είσοδο Y παλμογράφου. Σε αυτόν μπορούσαμε να παρατηρήσουμε σε ίχνος τη μεταβολή του ανοδικού ρεύματος συναρτήσει του δυναμικού επιτάχυνσης, το οποίο ήταν συνδεδεμένο στην είσοδο X.

Η λυχνία βρισκόταν σε θερμαινόμενη συσκευή με σύστημα ελέγχου σταθερής θερμοκρασίας, με ψηφιακή ένδειξη ακρίβειας 1°C, ώστε να έχουμε την επιθυμητή συγκέντρωση ατμών υδραργύρου.

Πειραματική διαδικασία

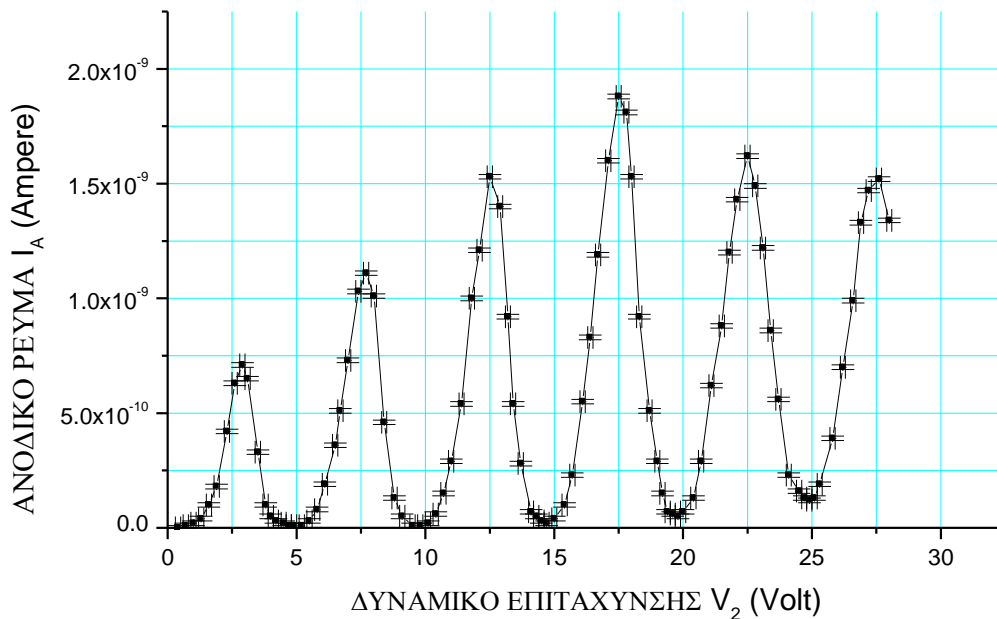
Ρυθμίσαμε τη θερμοκρασία της συσκευής θέρμανσης στους 200 °C. Ρυθμίσαμε την τάση V_3 κοντά στο 1.5 V και την τάση V_1 τόση ώστε να έχουμε το μέγιστο ανοδικό ρεύμα χωρίς να παρατηρούνται φαινόμενα κόρου. Στη συνέχεια μεταβάλλαμε την τάση επιτάχυνσης με μικρά βήματα μετρώντας κάθε φορά το ανοδικό ρεύμα. Οι μετρήσεις αυτές παρατίθενται στον πίνακα I.

Πίνακας I. Μετρήσεις ανοδικού ρεύματος συναρτήσει τάσης επιτάχυνσης σε θερμοκρασία 200 °C.

V_2 (V)	I_A (nA)	V_2 (V)	I_A (nA)	V_2 (V)	I_A (nA)	V_2 (V)	I_A (nA)
0.4	0.00	7.0	0.73	14.5	0.03	21.5	0.88
0.7	0.01	7.4	1.03	14.7	0.02	21.8	1.20
1.0	0.02	7.7	1.11	15.0	0.04	22.1	1.43
1.3	0.04	8.0	1.01	15.4	0.10	22.5	1.62
1.6	0.10	8.4	0.46	15.7	0.23	22.8	1.49
1.9	0.18	8.8	0.13	16.1	0.55	23.1	1.22
2.3	0.42	9.1	0.05	16.4	0.83	23.4	0.86
2.6	0.63	9.5	0.01	16.7	1.19	23.7	0.56
2.9	0.71	9.8	0.01	17.1	1.60	24.1	0.23
3.1	0.65	10.1	0.02	17.5	1.88	24.5	0.16
3.5	0.33	10.4	0.06	17.8	1.81	24.7	0.13
3.8	0.10	10.7	0.15	18.0	1.53	24.9	0.12
4.0	0.05	11.0	0.29	18.3	0.92	25.1	0.13
4.2	0.03	11.4	0.54	18.7	0.51	25.3	0.19
4.5	0.02	11.8	1.00	19.0	0.29	25.8	0.39
4.7	0.01	12.1	1.21	19.2	0.15	26.2	0.70
4.9	0.01	12.5	1.53	19.4	0.07	26.6	0.99
5.2	0.01	12.9	1.40	19.6	0.06	26.9	1.33
5.5	0.03	13.2	0.92	19.8	0.05	27.2	1.47
5.8	0.08	13.4	0.54	20.0	0.07	27.6	1.52

6.1	0.19	13.7	0.28	20.4	0.13	28.0	1.34
6.5	0.36	14.1	0.07	20.7	0.29		
6.7	0.51	14.3	0.05	21.1	0.62		

Με βάση τις τιμές του πίνακα I μπορούμε να παραστήσουμε γραφικά (γράφημα 1) τη μεταβολή του ανοδικού ρεύματος συναρτήσει του δυναμικού επιτάχυνσης έτσι ώστε να έχουμε μια καλύτερη εικόνα της μεταβολής αυτής.



Γράφημα 1. Μεταβολή του ανοδικού ρεύματος συναρτήσει του δυναμικού επιτάχυνσης με θερμοκρασία λυχνίας 200 °C.

Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνεται η τάση V_2 το ανοδικό ρεύμα αυξάνει. Αυτό σημαίνει ότι όλο και περισσότερα ηλεκτρόνια καταφέρνουν να φτάσουν στην άνοδο και να συμβάλλουν στο ανοδικό ρεύμα. Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται στο χώρο μεταξύ των πλεγμάτων ενώ παράλληλα συγκρούονται με τα άτομα των ατμών υδραργύρου. Όσο είναι μικρή η ενέργεια των ηλεκτρονίων οι κρούσεις είναι ελαστικές και τα ηλεκτρόνια δε χάνουν ενέργεια αλλά αλλάζουν μόνο κατεύθυνση. Από κάποια τιμή τάσης όμως και πάνω το ρεύμα μειώνεται. Κάποια ηλεκτρόνια σε αυτή τη φάση αποκτούν την αναγκαία ενέργεια ώστε να συγκρούονται μη ελαστικά

με τα άτομα του υδραργύρου χάνοντας έτσι μέρος της ενέργειάς τους, ενώ την κερδίζουν τα άτομα αυξάνοντας ισόποσα την εσωτερική τους ενέργεια. Τα ηλεκτρόνια έτσι μη έχοντας την κατάλληλη κινητική ενέργεια eV_3 δεν καταφέρνουν να φτάσουν στην άνοδο. Το ρεύμα μειώνεται σταδιακά όσο αυξάνεται η τάση μέχρι να φτάσει σε μια ελάχιστη τιμή για μια ορισμένη διαφορά δυναμικού. Σε αυτό το σημείο όλα τα ηλεκτρόνια που παράγονται από την κάθοδο αποκτούν την κατάλληλη ενέργεια έτσι ώστε να κάνουν μη ελαστικές κρούσεις, ενώ το υπόλοιπο της ενέργειας που τους απομένει δεν τα επιτρέπει να φτάσουν στην άνοδο.

Καθώς αυξάνεται περισσότερο το δυναμικό επιτάχυνσης το ρεύμα αυξάνεται και πάλι γιατί κάποια ηλεκτρόνια μετά την μη ελαστική κρούση μπορούν και επιταχύνονται τόσο ώστε να καταφέρουν να φτάσουν στην άνοδο. Το ρεύμα αυξάνεται συνεχώς με την αύξηση της τάσης. Σε κάποια τιμή τάσης όμως αρχίζει να μειώνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί κάποια ηλεκτρόνια μετά την πρώτη μη ελαστική κρούση που έκαναν αποκτούν και πάλι κατάλληλη κινητική ενέργεια για να συγκρουστούν μη ελαστικά όσο βρίσκονται ανάμεσα στα δύο πλέγματα, λόγω της υψηλής τιμής του δυναμικού επιτάχυνσης. Το ρεύμα μειώνεται συνέχεια όσο αυξάνεται η τάση, μέχρι να πάρει μια ελάχιστη τιμή και στη συνέχεια να αρχίσει να αυξάνει. Επαναλαμβάνεται έτσι το ίδιο φαινόμενο.

Η διαφορά τάσης μεταξύ δύο διαδοχικών ελαχίστων παρατηρούμε ότι είναι σταθερή και αυτό μας δείχνει ότι τα άτομα μπορούν να απορροφούν ορισμένα μόνο ποσά ενέργειας. Για τα συγκεκριμένα άτομα είναι ίση με την ενέργεια ηλεκτρονίων επιταχυνόμενων σε δυναμικό ίσο με τη διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο διαδοχικών ελαχίστων.

$$E_1 = e\Delta V \quad (2)$$

Λαμβάνοντας ελάχιστη τιμή ρεύματος για τάσεις $V : 0V, 4.9V, 9.7V, 14.7V, 19.6V, 24.9V$ προκύπτουν διαφορές μεταξύ διαδοχικών τιμών $x_i = \Delta V : 4.9V, 4.8V, 5.0V, 4.9V, 5.3V$. Για τις παραπάνω μετρήσεις ο μέσος όρος είναι :

$$\bar{x}_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 4.98V \quad (3)$$

Το σφάλμα που προκύπτει στο μέσο όρο από το σφάλμα ανάγνωσης της τιμής της τάσης είναι :

$$\sigma_{\Delta V_i} = \sqrt{\sigma_{V_j}^2 - \sigma_{V_k}^2}$$

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{V_i}^2} = 0.06V \quad (4)$$

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς, προκύπτει από τις πειραματικές τιμές μας σε θερμοκρασία λυχνίας 200°C, ότι για τον υδράργυρο η ενέργεια πρώτης διέγερσης είναι $E_1=(4.98\pm 0.06)eV$.

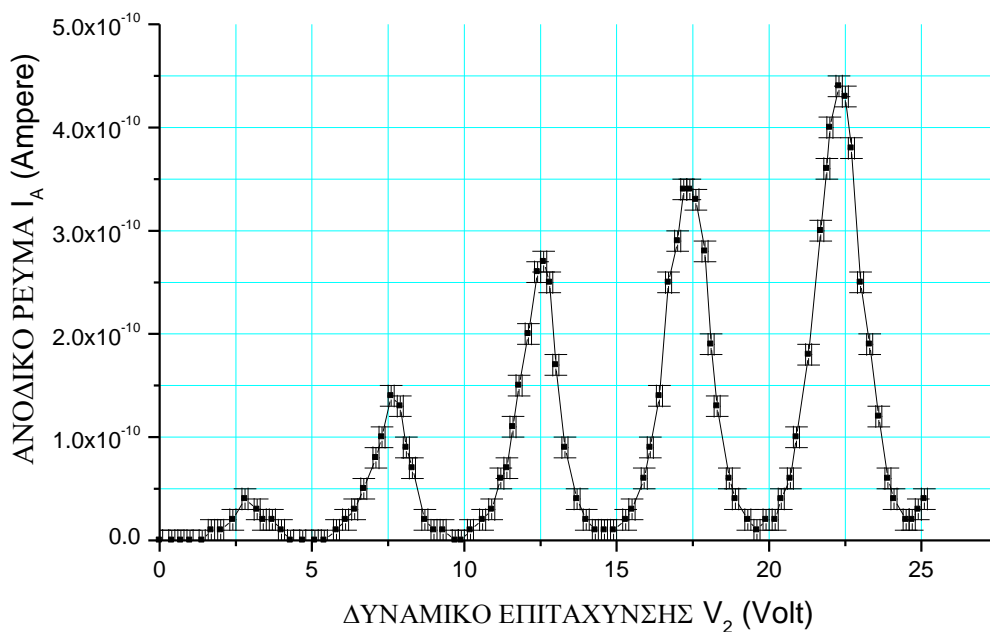
Στη συνέχεια αυξήσαμε τη θερμοκρασία στους 208°C και επαναλάβαμε τις ίδιες μετρήσεις. Οι μετρήσεις μας παρατίθενται στον πίνακα II.

Πίνακας II. Μετρήσεις ανοδικού ρεύματος συναρτήσει τάσης επιτάχυνσης σε θερμοκρασία 208 °C.

V ₂ (V)	I _A (nA)	V ₂ (V)	I _A (nA)	V ₂ (V)	I _A (nA)	V ₂ (V)	I _A (nA)
0.4	0.00	7.6	0.14	13.7	0.04	19.9	0.02
0.7	0.00	7.9	0.13	14.0	0.02	20.2	0.02
1.0	0.00	8.1	0.09	14.3	0.01	20.4	0.04
1.4	0.00	8.3	0.07	14.6	0.01	20.7	0.06
1.7	0.01	8.7	0.02	14.9	0.01	20.9	0.10
2.0	0.01	9.0	0.01	15.3	0.02	21.3	0.18
2.4	0.02	9.3	0.01	15.5	0.03	21.7	0.30
2.8	0.04	9.7	0.00	15.9	0.06	21.9	0.36
3.2	0.03	9.9	0.00	16.1	0.09	22.0	0.40
3.4	0.02	10.2	0.01	16.4	0.14	22.3	0.44
3.7	0.02	10.6	0.02	16.7	0.25	22.5	0.43
4.0	0.01	10.9	0.03	17.0	0.29	22.7	0.38
4.3	0.00	11.2	0.06	17.2	0.34	23.0	0.25
4.7	0.00	11.4	0.07	17.4	0.34	23.3	0.19
5.1	0.00	11.6	0.11	17.6	0.33	23.6	0.12
5.4	0.00	11.8	0.15	17.9	0.28	23.9	0.06
5.8	0.01	12.1	0.20	18.1	0.19	24.1	0.04
6.1	0.02	12.4	0.26	18.3	0.13	24.5	0.02
6.4	0.03	12.6	0.27	18.7	0.06	24.7	0.02
6.7	0.05	12.8	0.25	18.9	0.04	24.9	0.03
7.1	0.08	13.0	0.17	19.3	0.02	25.1	0.04

7.3	0.10	13.3	0.09	19.6	0.01		
-----	------	------	------	------	------	--	--

Με βάση τις τιμές του πίνακα II μπορούμε να παραστήσουμε γραφικά (γράφημα 2) τη μεταβολή του ανοδικού ρεύματος συναρτήσει του δυναμικού επιτάχυνσης έτσι ώστε να έχουμε μια καλύτερη εικόνα της μεταβολής αυτής με τη νέα θερμοκρασία της λυχνίας.



Γράφημα 2. Μεταβολή του ανοδικού ρεύματος συναρτήσει του δυναμικού επιτάχυνσης με θερμοκρασία λυχνίας 208 °C.

Παρατηρούμε ότι συμβαίνουν τα ίδια φαινόμενα, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο, με τη διαφορά ότι το ανοδικό ρεύμα είναι γενικά χαμηλότερης τιμής. Αυτό συμβαίνει γιατί σε υψηλότερη θερμοκρασία η συγκέντρωση των ατμών υδραργύρου είναι μεγαλύτερη. Η θερμική κίνηση των ατόμων είναι και αυτή πιο έντονη. Αποτέλεσμα αυτών είναι να μεγαλώνει η πιθανότητα να συμβαίνουν μη ελαστικές κρούσεις αμέσως μόλις αποκτήσουν τα ηλεκτρόνια κατάλληλη ενέργεια. Περισσότερες αναμένεται να είναι και οι ελαστικές κρούσεις, για τους ίδιους λόγους,

με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να ανακρούονται σε διάφορες κατευθύνσεις (προς τα τοιχώματα της λυχνίας ή ακόμα και αντίθετα στο ηλεκτρικό πεδίο). Λιγότερα έτσι ηλεκτρόνια αποκτούν την κατάλληλη ενέργεια eV_3 ώστε να συμβάλλουν στο ανοδικό ρεύμα.

Λαμβάνοντας και εδώ ελάχιστη τιμή ρεύματος που παρατηρείται για τάσεις $V : 0V, 5.1V, 9.8V, 14.6V, 19.6V, 24.6V$ προκύπτουν διαφορές μεταξύ διαδοχικών τιμών $x_i = \Delta V : 5.1V, 4.7V, 4.8V, 5.0V, 5.0V$. Για τις παραπάνω μετρήσεις ο μέσος όρος είναι :

$$\bar{x}_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 4.92V \quad (5)$$

Το σφάλμα που προκύπτει στο μέσο όρο από το σφάλμα ανάγνωσης της τιμής της τάσης είναι :

$$\begin{aligned} \sigma_{\Delta V_i} &= \sqrt{\sigma_{V_j}^2 - \sigma_{V_k}^2} \\ \sigma_{\bar{x}} &= \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{V_i}^2} = 0.06V \end{aligned} \quad (6)$$

Με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς, προκύπτει από τις πειραματικές τιμές μας σε θερμοκρασία λυχνίας $208^\circ C$ ότι για τον υδράργυρο η ενέργεια πρώτης διέγερσης είναι $E_1 = (4.92 \pm 0.06)eV$.

Κάνοντας στατιστική μελέτη στις τιμές ΔV των πειραματικών μετρήσεων έχουμε για την διακύμανση s^2 του δείγματος :

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_e)^2 \quad (7)$$

από όπου προκύπτει για το δείγμα από τις μετρήσεις των $200^\circ C : s^2 = 0.037$ και από τις μετρήσεις των $208^\circ C : s^2 = 0.027$.

Το σφάλμα από τη διασπορά των τιμών $x_i = \Delta V_i$ είναι :

$$\sigma'_x = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

από όπου προκύπτει για το δείγμα από τις μετρήσεις των 200°C : $\sigma_x=0.09V$ και από τις μετρήσεις των 208°C : $\sigma_x=0.07V$.

Η κατανομή χ^2 είναι :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}_e}{s} \right)^2 \quad (9)$$

από όπου προκύπτει και για τις δύο ομάδες μετρήσεων $\chi^2=4$, όσοι είναι και οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος ν για πειραματικές μετρήσεις ($\nu=n-1$).

Όπως αναφέραμε στη σελ.1 τα άτομα του υδραργύρου δεν παραμένουν σε διεγερμένη κατάσταση. Πολύ σύντομα επιστρέφουν στη βασική τους κατάσταση εκπέμποντας ένα φωτόνιο με ενέργεια ίση με τη διαφορά των δύο ενεργειακών καταστάσεων. Ίση δηλαδή με την ενέργεια πρώτης ενεργοποίησης. Λαμβάνοντας την τιμή που προέκυψε από τις μετρήσεις σε θερμοκρασία 208°C $E_1=(4.92\pm 0.06)eV$ η μέση τιμή της οποίας είναι πιο κοντά στην πραγματική τιμή ($E=4.89eV$) προκύπτει για το φωτόνιο που εκπέμπεται :

$$\begin{aligned} E_1 &= e\Delta V = hf \Rightarrow \\ \Rightarrow f &= \frac{e\Delta V}{h} = 11.896 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \end{aligned} \quad (10)$$

και το σφάλμα στη συχνότητα είναι :

$$\sigma_f = \frac{e\sigma_x}{h} = 0.145 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \quad (11)$$

Το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι :

$$\lambda = \frac{c}{f} = 2522 \text{ \AA} \quad (12)$$

και το σφάλμα στο μήκος κύματος :

$$\sigma_{\lambda}^2 = \left(\frac{\partial \lambda}{\partial f} \right)^2 \sigma_f^2 = \frac{c \sigma_f}{f^2} = 37 \text{ \AA} \quad (13)$$

Συνοψίζοντας λοιπόν για τα εκπεμπόμενα φωτόνια έχουμε $f=(11.896 \pm 0.145) \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ και $\lambda=(2522 \pm 37) \text{ \AA}$ ακτινοβολία που βρίσκεται στο φάσμα του υπεριώδους.

Συμπεράσματα

Κάνοντας ένα πείραμα παρόμοιο με αυτό των Frank-Hertz δείξαμε ότι τα άτομα προσλαμβάνουν ποσά ενέργειας με ασυνεχή τρόπο. Δείξαμε επίσης ότι ένας τρόπος να προσλάβουν ενέργεια είναι με σύγκρουση με άλλα σωματίδια (ηλεκτρόνια στην προκειμένη περίπτωση). Από το πείραμα προέκυψε ότι τα άτομα μεταβάλλουν την εσωτερική τους ενέργεια εις βάρος της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων (μη ελαστική σκέδαση ηλεκτρονίων). Υπολογίσαμε πόση είναι η ελάχιστη ενέργεια που μπορούν να προσλάβουν άτομα υδραργύρου. Στη συνέχεια η ενέργεια μετατρέπεται σε ακτινοβολία (φωτόνια) της οποίας υπολογίσαμε το μήκος κύματος. Το πείραμα εκτελέστηκε με καλή ακρίβεια όπως αποδεικνύεται από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Στο γράφημα 1 η πέμπτη και έκτη κορυφή που εμφανίζει η καμπύλη περιμέναμε να έχουν μεγαλύτερες τιμές, όπως συμβαίνει και στο γράφημα 2. Αυτό πιθανό να οφείλεται σε έλλειψη ενδιάμεσων τιμών. Αν η δειγματοληψία στα σημεία αυτά ήταν πυκνότερη το ρεύμα πιθανότατα θα έπαιρνε τις αναμενόμενες τιμές. Προτείνεται να γίνονται λεπτομερέστερες μετρήσεις σε σημεία που παρουσιάζεται μεγάλη καμπυλότητα.

Η παρατήρηση αυτή δεν αλλοιώνει τα αποτελέσματά μας γιατί η επεξεργασία που κάναμε αφορούσε τις ελάχιστες τιμές της καμπύλης.