



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Προχωρημένα Εργαστήρια Φυσικής Ι

Ελευθέριος Ηλιόπουλος

Τμήμα Φυσικής

Πείραμα IV Πείραμα Franck-Hertz

Στο πείραμα αυτό θα μελετήσουμε τις μη-ελαστικές σκεδάσεις ηλεκτρονίων από άτομα υδραργύρου, επαναλαμβάνοντας το ιστορικό πείραμα των James Franck και Gustav Hertz. Με την μεθοδολογία αυτή θα μετρήσουμε την ενέργεια διέγερσης του μονοατομικού Hg.

Θεωρητικό Μέρος

Στις αρχές του 20ου αιώνα ήταν γνωστό ότι τα ατομικά φάσματα εκπομπής ή απορρόφησης ήταν διακριτά, δηλαδή ότι τα άτομα απορροφούν και εκπέμπουν ακτινοβολία με συγκεκριμένα μόνο μήκη κύματος. Το ατομικό πρότυπο, που διατυπώθηκε από το Niels Bohr το 1913, πρότεινε ότι αυτό οφείλεται σε μία εγγενή κβάντωση των επιτρεπτών ενεργειών των ατομικών ηλεκτρονίων. Το 1914, οι J. Franck και G. Hertz πραγματοποίησαν ένα ιστορικό πείραμα σκέδασης ηλεκτρονίων από άτομα μονοατομικών αέριων, με σκοπό τον πειραματικό έλεγχο του προτεινόμενου ατομικού πρότυπου. Με το πείραμα αυτό επαλήθευσαν ότι:

- Είναι δυνατή η διέγερση ατόμων μέσω μη-ελαστικών σκεδάσεων με ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας
- Τα ποσό της ενέργειας που μεταφέρεται από ένα ηλεκτρόνιο σε ένα άτομο αερίου, κατά την διάρκεια μια τέτοιας ανελαστική σκέδασης, είναι πάντα το ίδιο και είναι χαρακτηριστικό του αερίου και
- Οι ενεργειακές διαφορές των διακριτών ατομικών ηλεκτρονικών ενεργειακών επιπέδων, όπως υπολογίζονται από τα πειράματα σκέδασης ηλεκτρονίων-ατόμων συμφωνούν με αυτές που λαμβάνονται από πειράματα οπτικής φασματοσκοπίας.

Έτσι το πείραμα αυτό έδωσε ισχυρά δεδομένα υπέρ της, αναδυόμενης τότε, κβαντικής θεωρίας και οι J. Franck και G. Hertz τιμήθηκαν, για αυτό, με το βραβείο Nobel Φυσικής, για το έτος 1925.

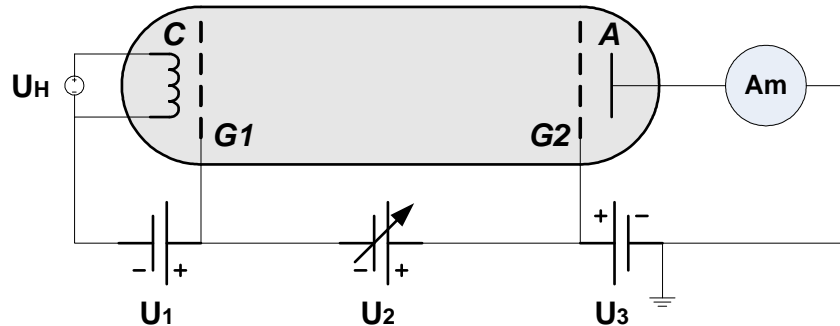
Περιγραφή Πειραματικής Μεθοδολογίας

Για την πραγματοποίηση του πειράματος Franck-Hertz θα χρησιμοποιηθεί κατάλληλος κλειστός αερόκενος σωλήνας (σωλήνας F-H) που περιέχει μικρή ποσότητα υδραργύρου (Hg). Σχηματικά η εσωτερική δομή και τα στοιχεία του παρουσιάζονται στην Εικ.1. Τα κύρια δομικά στοιχεία του σωλήνα είναι η θερμαινόμενη κάθοδος (C), τα δύο πλέγματα (G1 και G2) και η άνοδος (A). Η βασική ιδέα του πειράματος είναι απλή:

- Η δέσμη ηλεκτρονίων παράγεται με θερμιονική εκπομπή από την κάθοδο
- Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται μεταξύ καθόδου και πλέγματος 2 λόγω του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργούμε με την εφαρμογή κατάλληλων διαφορών δυναμικών (το προφίλ του δυναμικού ελέγχεται από τα εφαρμοζόμενα δυναμικά U_1 , U_2 και U_3).
- Σε όλο τον χώρο του σωλήνα υπάρχουν άτομα Hg (αέρια κατάσταση) που δημιουργούνται από την εξάχνωση του υδραργύρου. Ο σωλήνας F-H τοποθετείται εντός μικρού φούρνου με ελεγχόμενη θερμοκρασία και έτσι ελέγχεται η τάση ατμών του Hg στον σωλήνα.
- Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την θερμαινόμενη κάθοδο, σκεδάζονται (ελαστικά ή μη-ελαστικά) από τα άτομα του Hg, και στην συνέχεια προσπίπτουν πάνω στην άνοδο δημιουργώντας ένα ανοδικό ρεύμα που μετρούμε μέσω ευαίσθητου αμπερομέτρου (Am).
- Το παρατηρούμενο ανοδικό ρεύμα έχει τιμή ανάλογη της ταχύτητας των προσπιπτόντων στην άνοδο ηλεκτρονίων και άρα ανάλογη της τετραγωνικής ρίζας της

κινητικής τους ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό ουσιαστικά μετράμε την ενέργεια των ηλεκτρονίων που φτάνουν στην άνοδο.

- Η βασική μεθοδολογία για να μελετήσουμε την μεταφορά ενέργειας από τα ηλεκτρόνια στα άτομα του υδραργύρου μέσω μη ελαστικών σκεδάσεων, σαν συνάρτηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων, είναι η καταγραφή του ανοδικού ρεύματος σαν συνάρτηση του κύριου επιταχυντικού δυναμικού (U_2) που εφαρμόζουμε μεταξύ των δύο πλεγμάτων.



Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση σωλήνα Franck-Hertz όπου φαίνονται: η θερμαινόμενη κάθοδος (C), τα δύο πλέγματα (G1 και G2), η άνοδος (A), το μετρητικό ρεύμα ανόδου (I_m), η τάση θέρμανσης της καθόδου (U_H) και οι εφαρμοζόμενες τάσεις μεταξύ καθόδου-πλέγματος 1 (U_1), μεταξύ των δύο πλεγμάτων (U_2) και μεταξύ πλέγματος 2 και ανόδου (U_3).

Ελαστική και μη-ελαστική σκέδαση ηλεκτρονίων από άτομα Hg

Αν η ενέργεια των ηλεκτρονίων είναι μικρότερη από την ελάχιστη ενέργεια $E_{κατ}$ που απαιτείται για την διέγερση των ατόμων του υδραργύρου (4.69 eV, που αντιστοιχεί στην μετάβαση $6S_0 \rightarrow 6P_0$) τότε οι σκεδάσεις είναι ελαστικές, δηλαδή υπάρχει διατήρηση της ολικής κινητικής ενέργειας του συστήματος βλήματος-στόχου (ηλεκτρονίου-ατόμου Hg). Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη απώλεια κινητικής ενέργειας του ηλεκτρονίου που μπορεί να λάβει χώρα είναι (για την περίπτωση πλήρους οπισθοσκέδασης):

$$\Delta E_{kin} = \frac{4 \cdot m_e \cdot M_{Hg}}{(m_e + M_{Hg})^2} \cdot E_{kin} \quad (\text{Εξ.1})$$

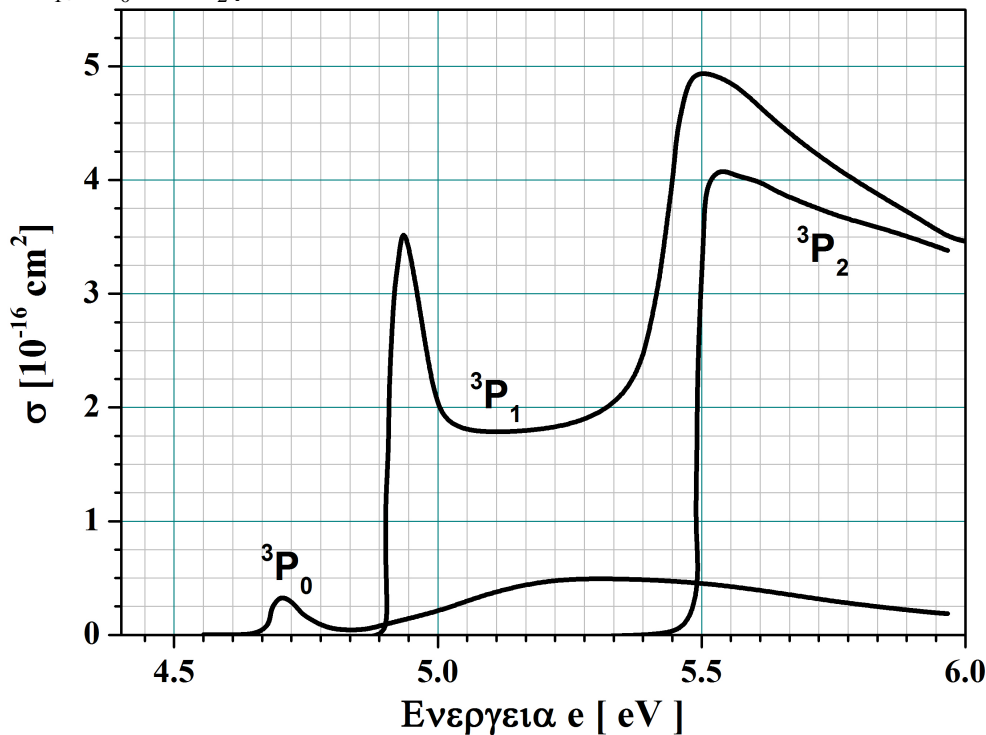
Από το παραπάνω αποτέλεσμα είναι φανερό ότι στην περίπτωση ελαστικών σκεδάσεων, λόγω της πολύ μικρής τιμής του λόγου $m_e / M_{Hg} \sim 3 \times 10^{-6}$ ότι οι απώλειες κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων είναι αμελητέες.

Επίσης η ενεργός διατομή των ελαστικών σκεδάσεων είναι σχεδόν ανεξάρτητη από την κινητική ενέργεια των e και μπορεί να προσεγγιστεί από την σχέση $\sigma \sim \pi \cdot R_{Hg}^2$ όπου R_{Hg} η "ακτίνα" του ατόμου του υδραργύρου (στην πραγματικότητα υπάρχει εξάρτηση της ενεργού διατομής από την ενέργεια του σωματιδίου-βλήματος, αλλά η επίδραση της εξάρτησης αυτής είναι αμελητέα για την ανάλυση του παρόντος πειράματος).

Στην περίπτωση όμως που η αρχική κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων ξεπεράσει το παραπάνω το κατώφλι ενέργειας τότε παρατηρούνται μη-ελαστικές σκεδάσεις καθώς σημαντικό μέρος της αρχικής κινητικής ενέργειας του σωματιδίου-βλήματος διοχετεύεται στην διέγερση (ηλεκτρονική μετάβαση) του στόχου (άτομο Hg). Τότε οι απώλειες κινητικής ενέργειας του ηλεκτρονίου είναι πολύ μεγάλες (σχεδόν ολική απώλεια της αρχικής κινητικής του ενέργειας)

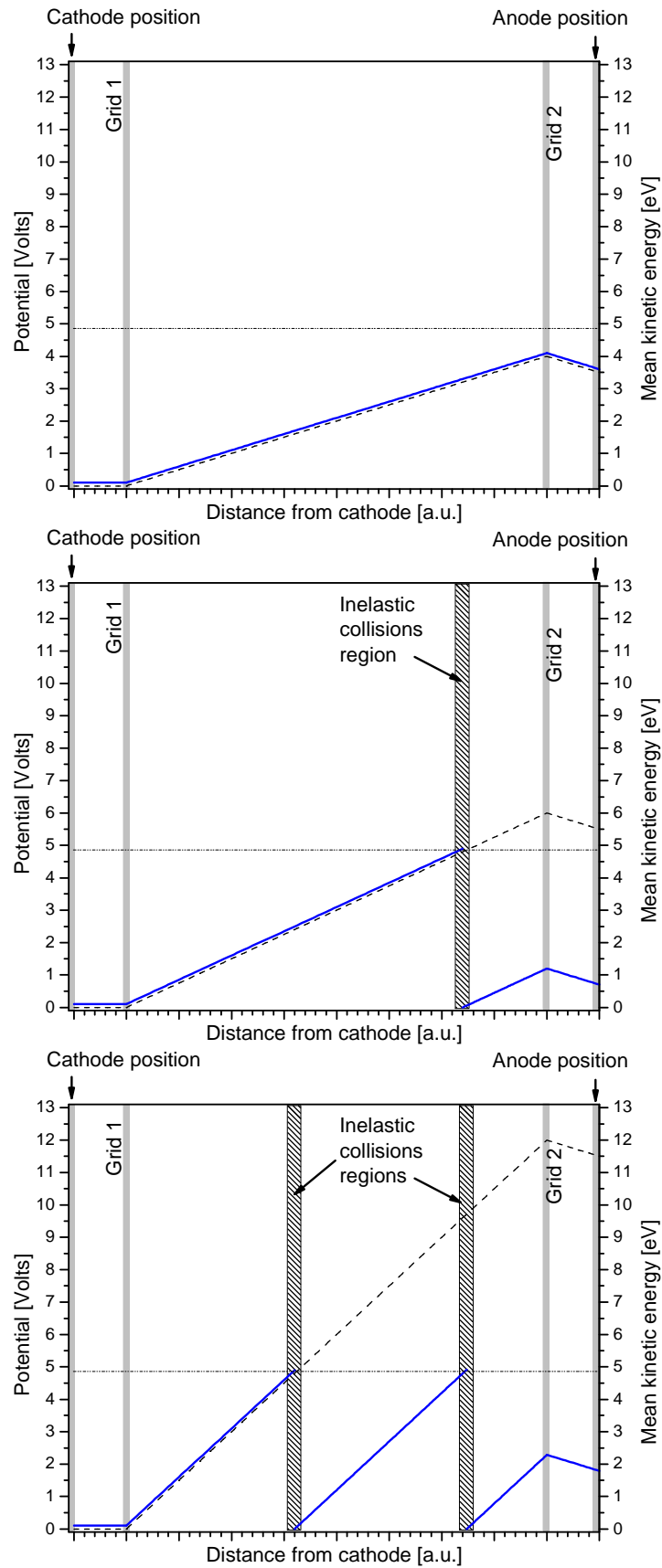
Πολύ σημαντική στην περίπτωση των ανελαστικών αυτών σκεδάσεων είναι η πολύ ισχυρή εξάρτηση της ενεργού διατομής τους από την ενέργεια του σωματιδίου-βλήματος. Στην Εικ. 2 παρουσιάζεται η ενεργός διατομή των σκεδάσεων e-Hg σαν συνάρτηση της ενέργειας των

ε για τις τρεις περιπτώσεις πιθανής ηλεκτρονικής μετάβασης των ατόμων Hg ($6S_0 \rightarrow 6^3P_0$, $6S_0 \rightarrow 6^3P_1$, $6S_0 \rightarrow 6^3P_2$)



Εικόνα 2: Ενεργές διατομές μη ελαστικών σκεδάσεων, σαν συνάρτηση της ενέργειας των ηλεκτρονίων, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές μεταβάσεις του Hg. [Πηγή: *Am. J. Phys.* **56**, 688 (1988)]

Για την κατανόηση του φυσικού μηχανισμού που λαμβάνει χώρα κατά την διεξαγωγή του πειράματος ας θεωρήσουμε την περίπτωση που η τάση U_1 είναι μηδέν και η μέση κινητική ενέργεια των εκπεμπόμενων, από την κάθοδο, ηλεκτρονίων στην θέση του πλέγματος G1 είναι πολύ μικρή (~ 0.1 eV). Επίσης θεωρούμε ότι εφαρμόζουμε ένα μικρό επιβραδυντικό δυναμικό μεταξύ του πλέγματος G2 και της ανόδου (τάση $U_3 = 0.5$ V). Ο ρόλος του επιβραδυντικού αυτού δυναμικού είναι σημαντικός για την σωστή εκτέλεση του πειράματος, καθώς μόνο τα ηλεκτρόνια που φτάνουν στην περιοχή του πλέγματος 2 με κινητική ενέργεια μεγαλύτερη από $q_e \cdot U_3$ μπορούν να ξεπεράσουν τον φραγμό δυναμικού, μεταξύ του πλέγματος 2 και της ανόδου, και να συνεισφέρουν στο μετρούμενο ανοδικό ρεύμα. Ας θεωρήσουμε τώρα την περίπτωση που η εφαρμοζόμενη τάση U_2 , μεταξύ των δύο πλεγμάτων, είναι μικρότερη από την τιμή $E_{\text{κατ}} / q_e$ (στην περίπτωση της Εικ.3(α) είναι 4 V). **Αν αγνοήσουμε, προς το παρόν, τις ελαστικές σκεδάσεις των ηλεκτρονίων και τα φαινόμενα φορτίου χώρου** (παρότι στην πραγματικότητα και τα δύο φαινόμενα διαδραματίζουν σοβαρό ρόλο), τότε, το ηλεκτρικό δυναμικό που αναπτύσσεται, μέσα στο σωλήνα Franck-Hertz, σαν συνάρτηση της οριζόντιας θέσης x (απόσταση από την κάθοδο) και η μέση κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων \bar{E}_{kin} , σαν συνάρτηση της οριζόντιας θέσης x επίσης, περιγράφονται στο διάγραμμα της Εικ.3(α) από την διακεκομμένη γραμμή και την πλήρη γραμμή αντίστοιχα. Ουσιαστικά, τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται συνεχώς κάτω από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται λόγω της εφαρμοζόμενης τάσης U_2 μέχρι να φτάσουν στο πλέγμα G2, και στην συνέχεια, ξεπερνώντας το φραγμό δυναμικού μεταξύ πλέγματος G2 και ανόδου, προσπίπτει στην άνοδο, συνεισφέροντας στο ανοδικό ρεύμα.



Εικόνα 3: Διαμόρφωση ηλεκτρικού δυναμικού και μέση κινητική ενέργεια ηλεκτρονίων, σαν συνάρτηση της απόστασης από την κάθοδο, σε σωλήνα F-H, για διάφορες περιπτώσεις εφαρμοζόμενης τάσης U_2 .

Στην Εικ.3(β) περιγράφεται αντίστοιχα η περίπτωση όπου η εφαρμοζόμενη τάση U_3 είναι λίγο μεγαλύτερη από την τιμή $E_{κατ} / q_e$ (στην περίπτωση αυτή 6 V). Όπως φαίνεται, στην περίπτωση αυτή η χωρική κατανομή της μέσης κινητικής ενέργειας $\bar{E}_{kin}(x)$ των ηλεκτρονίων αλλάζει δραματικά. Τα ηλεκτρόνια, μετά το πλέγμα G1 επιταχύνονται κάτω από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου και ως μία απόσταση από την κάθοδο η \bar{E}_{kin} τους αυξάνει μονότονα με την απόσταση x . Όταν όμως η τιμή της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων υπερβεί την τιμή κατωφλίου των 4.86 eV, που αντιστοιχεί στην μετάβαση $6S_0 \rightarrow 6^3P_1$ του Hg, τότε τα ηλεκτρόνια σκεδάζονται ανελαστικά και η κινητική τους ενέργεια σχεδόν μηδενίζεται. Έτσι μέσα στον σωλήνα Franck-Hertz δημιουργείται μία στενή περιοχή όπου λαμβάνουν χώρα πληθώρα ανελαστικών σκεδάσεων και η μέση κινητική ενέργεια της δέσμης σχεδόν μηδενίζεται. Μετά την περιοχή αυτή η κινητική τους ενέργεια ξαναρχίζει να αυξάνεται μονοτονα με την απόσταση κάτω από την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου αλλά πλέον, όταν προσπίπτουν στην άνοδο είναι μικρότερη από αυτή της προηγούμενης περίπτωσης, με συνέπεια το μετρούμενο ανοδικό ρεύμα να είναι μειωμένο σε σχέση με την περίπτωση της Εικ.3(α). Είναι φανερό ότι η περιοχή που συμβαίνουν οι ανελαστικές σκεδάσεις βρίσκεται πολύ κοντά στο πλέγμα G2, όταν η εφαρμοζόμενη τάση U_2 έχει τιμή λίγο μεγαλύτερη της $E_{κατ} / q_e$, και το ανοδικό ρεύμα παίρνει μια ελάχιστη τιμή. Όσο αυξάνει η τάση U_2 πέρα από την τιμή $E_{κατ} / q_e$, η περιοχή των ανελαστικών σκεδάσεων μετατοπίζεται προς τα αριστερά και το ανοδικό ρεύμα αρχίζει να αυξάνει πάλι μονότονα με την αύξηση της U_2 . Η μονότονη αυτή αύξηση συνεχίζεται έως η τάση U_2 γίνει αρκετά υψηλή ώστε τα ηλεκτρόνια που σκεδάστηκαν ανελαστικά, πρωτίτερα στον σωλήνα, να αποκτήσουν πάλι αρκετή κινητική ενέργεια, λίγο πριν φτάσουν στο πλέγμα G2, ικανή να οδηγήσει σε νέες ανελαστικές σκεδάσεις. Τότε μέσα στο σωλήνα δημιουργούνται δύο περιοχές με έντονες ανελαστικές σκεδάσεις e-Hg και το ανοδικό ρεύμα πάλι ελαχιστοποιείται. Περαιτέρω αύξηση της τάσης U_2 οδηγεί σε νέα αύξηση του ανοδικού ρεύματος σε σχέση με το νέα αυτή ελάχιστη τιμή (βλ. Εικ3(γ)).

Από την παραπάνω περιγραφή είναι φανερό ότι χρησιμοποιώντας τον σωλήνα με αυτή την διαμόρφωση, δηλαδή μικρό σταθερό επιταχυντικό δυναμικό U_1 καθόδου και του πλέγματος G1 και μικρό επιβραδυντικό δυναμικό U_3 μεταξύ του πλέγματος G2 και της ανόδου και μεταβάλλοντας την τάση U_2 λαμβάνουμε μία χαρακτηριστική ανοδικού ρεύματος – τάσης U_2 που παρουσιάζει διαδοχικές βυθίσεις.

Οι βυθίσεις αυτές θα παρουσιάζονται σε τιμές της U_2 που ισαπέχουν κατά $E_{κατ} / q_e$ και έτσι μπορούμε να εξάγουμε την τιμή της ενέργειας κατωφλίου που απαιτείται για την διέγερση της μετάβασης $6S_0 \rightarrow 6^3P_1$ των ατόμων υδραργύρου.

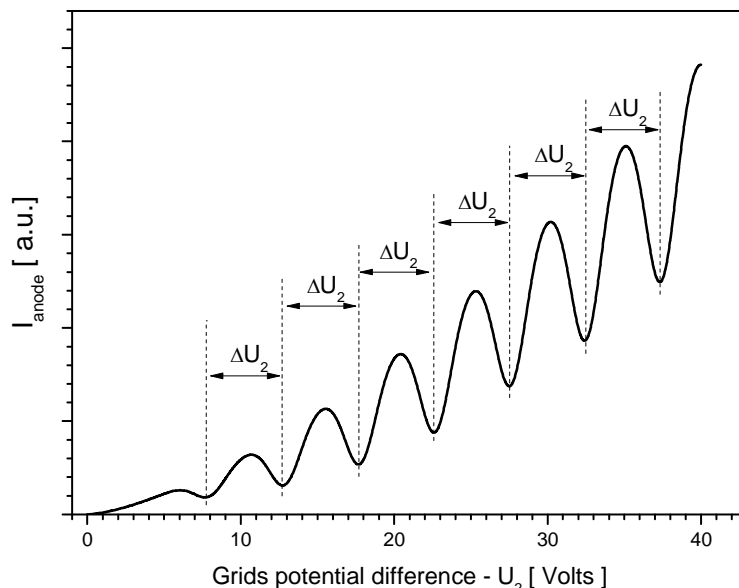
Ένα τέτοιο παράδειγμα $I_{anode} - U_2$ χαρακτηριστικής παρουσιάζεται στην Εικ.4. Οι βυθίσεις από τα μέγιστα δεν είναι αυστηρά απότομες, αν και από την παραπάνω περιγραφή κάτι τέτοιο θα ήταν αναμενόμενο. Αυτό οφείλεται σε τρεις κυρίως λόγους: (α) Τα εκπεμπομένα ηλεκτρόνια από την θερμοκάθοδο δεν έχουν αυστηρά καθορισμένη ενέργεια – η στατιστική κατανομή των ενεργειών τους προσεγγίζει αυτή της κατανομής Boltzmann, (β) η ενεργός διατομή των μη-ελαστικών σκεδάσεων εξαρτάται ισχυρά από την ενέργεια των ηλεκτρονίων-βλέπε Εικ.2 και (3) η παρουσία ελαστικών σκεδάσεων που “διαπλάτυνει” την ενεργειακή κατανομή των ηλεκτρονίων.

Η ακριβής μορφή της χαρακτηριστικής $I_{anode} - U_2$ επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες:

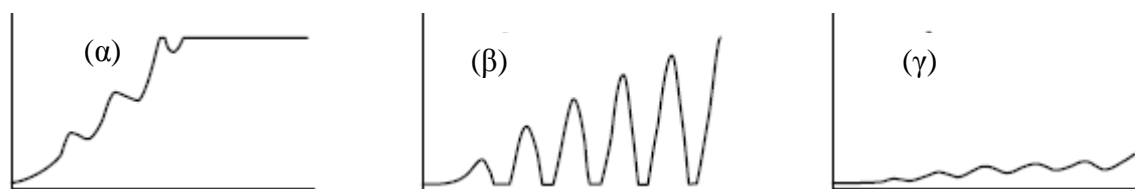
(1) Την τιμή της εφαρμοζόμενης τάσης U_1 που εφαρμόζουμε μεταξύ καθόδου και πλέγματος G1. Η τάση αυτή καθορίζει σημαντικά την πυκνότητα ρεύματος, που διέρχεται από το πλέγμα G1. Έτσι αν η εφαρμοζόμενη τάση είναι πολύ μικρή το μετρούμενο ανοδικό ρεύμα θα είναι συνολικά πολύ ασθενές, ενώ αντίθετα αν είναι πολύ μεγάλη το ανοδικό ρεύμα μπορεί να γίνει υπερβολικά μεγάλο και να κορέσει το μετρητικό σύστημα.

(2) Το επιβραδυντικό δυναμικό μεταξύ πλέγματος G2 και ανόδου. Εν γένει υψηλότερη τάση U_3 οδηγεί σε πιό ευδιάκριτες βυθίσεις. Αν όμως η τάση γίνει υπερβολικά υψηλή μπορεί να οδηγήσει σε μηδενισμό του ανοδικού ρεύματος κοντά στα ελάχιστα της χαρακτηριστικής με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός τους.

(3) Η θερμοκρασία του φούρνου που τοποθετείται ο σωλήνας Franck-Hertz που καθορίζει την μερική πίεση (δηλαδή την συγκέντρωση) του Hg. Αν η μερική πίεση είναι πολύ μικρή τότε οι βυθίσεις δεν θα είναι παρατηρήσιμες καθώς θα ελαχιστοποιηθούν οι σκεδάσεις e-Hg. Στην αντίθετη περίπτωση, που η συγκέντρωση των ατόμων υδραργύρου γίνει πολύ μεγάλη, τότε μειώνεται σημαντικά συνολικά το ανοδικό ρεύμα και ταυτόχρονα διαπλατώνονται οι βυθίσεις λόγω μεγάλης αύξησης του ρυθμού των ελαστικών σκεδάσεων.



Εικόνα 4: Παράδειγμα χαρακτηριστικής ρεύματος ανόδου σαν συνάρτηση της τάσης U_2 σε πείραμα F-H. (Τα δεδομένα δεν είναι πραγματικά πειραματικά, αλλά έχουν "κατασκευαστεί" για λόγους ευκρίνειας.)

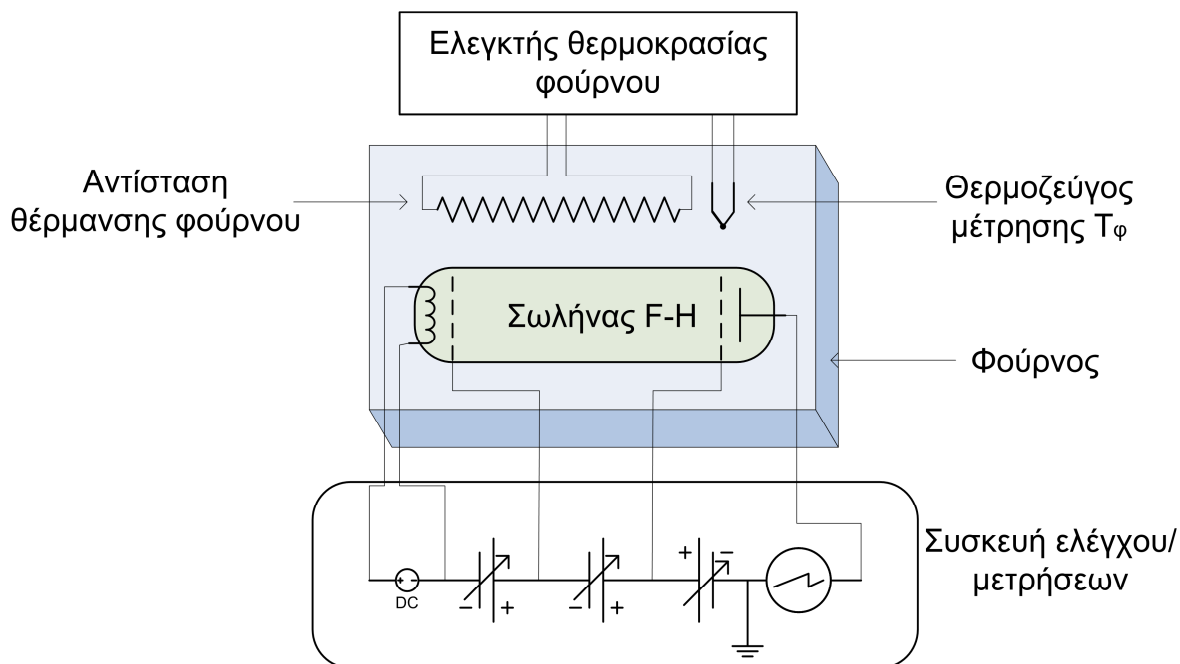


Εικόνα 5: Περιπτώσεις χαρακτηριστικών ρεύματος ανόδου-τάσης U_2 για μη βελτιστοποιημένες συνθήκες του πειράματος. [Πηγή: Leybold Didactic GmbH]

Πειραματικό μέρος

Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη που θα χρησιμοποιήσετε παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικ.6. Αποτελείται από ένα σωλήνα F-H, ένα φούρνο ελεγχόμενης θερμοκρασίας (T_ϕ) και μία συσκευή ελέγχου/μετρήσεων. Ο σωλήνας F-H τοποθετείται εντός του φούρνου και έτσι βρίσκεται σε σταθερή, ελεγχόμενη θερμοκρασία. Η συγκέντρωση των ατόμων Hg στον σωλήνα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας αυτής, οπότε μπορούμε να την μεταβάλουμε. Η συσκευή ελέγχου/μετρήσεων μας επιτρέπει να ρυθμίζουμε, κατά βούληση, την τάση θέρμανσης της καθόδου U_H , τις τάσεις U_1 , U_2 , U_3 (βλ. Εικ.1), καθώς και να παίρνουμε μετρήσεις του ρεύματος ανόδου.



Εικόνα 6: Πειραματική διάταξη πείραματος F-H

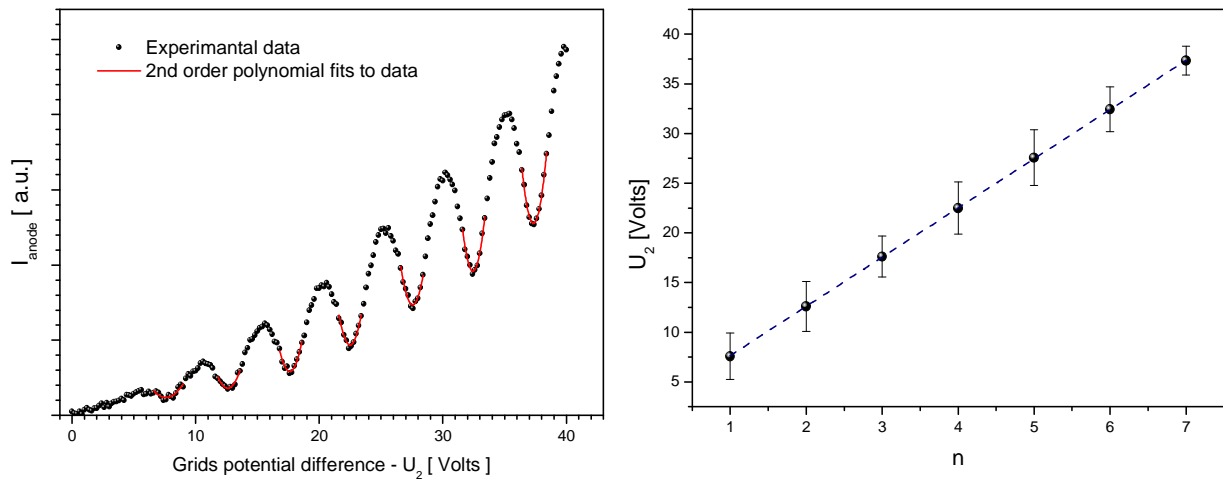
Πειραματική Μετρήσεις

- (α) Τοποθετήστε τον σωλήνα F-H εντός του φούρνου.
- (β) Βεβαιωθείτε ότι όλες οι τάσεις U_H , U_1 , U_2 , U_3 είναι μηδενισμένες και ρυθμίστε την θερμοκρασία του φούρνου T_{ϕ} στους 175°C .
- (γ) Περιμένετε ~ 30 mins για να φτάσει ο σωλήνας στην επιθυμητή θερμοκρασία. Αυτό είναι σημαντικό για να μην υπάρχουν εντός του σωλήνα σταγόνες Hg, και να αποφευχθούν βραχυκυκλώματα μεταξύ των ηλεκτροδίων του σωλήνα.
- (δ) Θερμάνετε το νήμα της καθόδου κάθοδο, εφαρμόζοντας τάση $U_H = 6.3$ V.
- (ε) Ρυθμίστε την τάση U_1 , μεταξύ καθόδου και πλέγματος 1, στα ~ 5.0 V και την επιβραδυντική τάση U_3 μεταξύ πλέγματος 2 και ανόδου στα ~ 0.5 V.
- (στ) Μετρήστε την χαρακτηριστική ρεύματος ανόδου-τάσης U_2 μεταξύ πλέγματων 1 και 2, για τιμές της τάσης U_2 μεταξύ 0 και 30 V. Χρησιμοποιήστε μικρό βήμα $\Delta U_2 = 0.25$ V ή και μικρότερο γύρω από τα ελάχιστα.
- (ζ) Ρυθμίστε την θερμοκρασία του φούρνου στους 180°C . Περιμένετε αρκετά μέχρι η ένδειξη θερμοκρασίας να φτάσει και να σταθεροποιηθεί στην τιμή αυτή.
- (η) Μετρήστε την χαρακτηριστική ρεύματος ανόδου-τάσης U_2 όπως στο (στ)
- (θ) Επαναλάβετε για θερμοκρασία $T_{\phi} = 185^{\circ}\text{C}$.

Ανάλυση Μετρήσεων

- (α) Σχεδιάστε προσεκτικά τις χαρακτηριστικές $I_{anode} - U_2$ που μετρήσατε για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις T_{ϕ} .
- (β) Σε κάθε περίπτωση προσδιορίστε προσεκτικά τις θέσεις (τιμές της τάσης) των ελαχίστων. Για μεγαλύτερη ακρίβεια προσδιορίστε τα χρησιμοποιώντας προσαρμογή παραβολικής συνάρτησης στα πειραματικά δεδομένα γύρω από το σημείο που παρουσιάζεται το ελάχιστο (βλ. Εικ.7(α)).
- (γ) Σε κάθε περίπτωση κάντε το γράφημα των τιμών ελαχίστων σαν συνάρτηση της τάξης του ελαχίστου ($n=1,2,3,\dots$) και προσαρμόστε ευθεία ελαχίστων τετραγώνων (βλ. Εικ7(γ)).

Από την κλίση της ευθείας προσδιορίστε την τιμή της ενέργειας διέγερσης $6S_0 \rightarrow 6^3P_1$ των ατόμων υδραργύρου.



Εικόνα 7: Παράδειγμα ανάλυσης δεδομένων πειράματος Franck-Hertz.

Βιβλιογραφία

- [1] R.A. Serway, C.J. Moses, C.A. Moyer, "Σύγχρονη Φυσική", Πανεπ. Εκδ. Κρήτης (2011)
- [2] A.C. Melissinos, "Experiments in Modern Physics", Academic Press
- [3] W. Demtröder, "Atoms, Molecules and Phonons", Springer Eds (2010)

Σημειώματα

Σημείωμα αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Κρήτης, Ελ. Ηλιόπουλος, 2014. «Προχωρημένα Εργαστήρια Φυσικής Ι.». Έκδοση: 1.0. Ηράκλειο 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://opencourses.uoc.gr>.

Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση, Όχι Παράγωγο Έργο 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Κρήτης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

