

Άσκηση 6

Το πείραμα Franck-Hertz

6.1. Σκοπός

Στην άσκηση αυτή, μέσω του πειράματος Franck-Hertz, θα πιστοποιηθεί η ύπαρξη διακριτών ενεργειακών σταθμών στο άτομο του αερίου Νέον (Ne). Θα παρατηρηθεί η διέγερση και η αποδιέγερση των ατόμων, όταν αυτά βομβαρδίζονται με ελεύθερα ηλεκτρόνια. Θα μετρηθεί η ενέργεια διέγερσης του Ne στην πρώτη διεγερμένη ενεργειακή στάθμη, όπως και το εξωτερικό δυναμικό επαφής μεταξύ δύο αγωγών. Επίσης, θα ελεγχθεί πειραματικά η υπόθεση περί μηδενισμού της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων στις ανελαστικές κρούσεις.

6.2. Γενικά

6.2.1. Τα ιστορικά πειράματα Franck-Hertz

Τα πειράματα των J. Franck και G. Hertz το 1914 θεωρήθηκαν ως η πρώτη άμεση πειραματική επιβεβαίωση των προτάσεων του N. Bohr για τη δομή του ατόμου που διατυπώθηκαν έναν χρόνο νωρίτερα. Δεδομένης της σημασίας των τελευταίων για την οικοδόμηση της Κβαντικής Μηχανικής και των σύγχρονων αντιλήψεων για το άτομο, οι δύο επιστήμονες τιμήθηκαν για το έργο τους με το βραβείο Nobel το 1925.

Μελετώντας την κίνηση ελεύθερων ηλεκτρονίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου μέσα σε ατμούς υδραργύρου (Hg), οι Franck και Hertz έδειξαν τα ακόλουθα:

(α) Όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα άτομα Hg και η ενέργειά τους διαφέρει από μια κρίσιμη τιμή, τότε η σύγκρουσή τους με τα άτομα είναι σχεδόν απόλυτα ελαστική. Τα άτομα δεν αλλάζουν την ενεργειακή τους κατάσταση, ενώ τα ηλεκτρόνια, μετά τη σύγκρουση, διατηρούν την κινητική τους ενέργεια και αλλάζουν μόνο τη φορά της κίνησής τους.

Άλλωστε η ιδιότητα αυτή είναι αναμενόμενη και προκύπτει και από τους νόμους της Κλασικής Φυσικής, όταν εξετάζει κανείς τη σύγκρουση δύο σωματιδίων. Πράγματι, σύμφωνα με τις αρχές διατήρησης ορμής και ενέργειας, η απώλεια της κινητικής ενέργειας ΔE_k του ηλεκτρονίου δεν ξεπερνά την τιμή

$$\Delta E_k = \frac{4E_k m M}{(m + M)^2} \quad (6.1)$$

όπου m και E_k είναι η μάζα και η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου και M η μάζα του ατόμου Hg. Σε αυτή την περίπτωση, η αναμενόμενη απώλεια ενέργειας είναι μικρότερη από 0,01 %.

(β) Έδειξαν ακόμη ότι η Εξ. (6.1) ισχύει μόνο όταν οι ενέργειες των ελεύθερων ηλεκτρονίων διαφέρουν από 4,90 eV. Όταν το ελεύθερο ηλεκτρόνιο τη στιγμή της σύγκρουσης έχει κινητική ενέργεια ακριβώς 4,90 eV (ορθότερα, με μια διασπορά της τάξης των 10-20 meV), το ηλεκτρόνιο χάνει όλη την κινητική του ενέργεια (απώλεια 100 %), παραμένοντας ελεύθερο, δηλαδή χωρίς να ενωθεί με το άτομο.

(γ) Τέλος, ανέφεραν άλλη μία αξιοσημείωτη παρατήρηση: στον χώρο όπου γίνονται οι μη ελαστικές κρούσεις, τα άτομα Hg εκπέμπουν υπεριώδη ακτινοβολία, το μήκος κύματος της

οποίας είναι 2537 Å. Σύμφωνα με τη γνωστή σχέση Plank-Einstein, η ενέργεια αυτών των φωτονίων είναι 4,90 eV!

Τα πειραματικά δεδομένα των Franck και Hertz ερμηνεύτηκαν ως εξής: Στο άτομο του υδραργύρου, εκτός από τη θεμελιώδη κατάσταση με ενέργεια E_0 , στην οποία μπορεί να βρίσκεται επ' άπειρο, υπάρχουν και διεγερμένες καταστάσεις που δημιουργούν ένα διακριτό σύνολο τιμών: $E_1, E_2, E_3, E_4, \dots, E_n$. Πλησιέστερη προς την E_0 είναι η E_1 , που η τιμή της είναι υψηλότερη κατά 4,90 eV. Επομένως, όταν οι ενέργειες των ελεύθερων ηλεκτρονίων είναι π.χ. 4,80 ή 5,00 eV, η σύγκρουσή τους με τα άτομα είναι σχεδόν απόλυτα ελαστική και τα ηλεκτρόνια χάνουν πολύ μικρό μέρος της κινητικής τους ενέργειας. Όταν όμως οι ενέργειές τους είναι ακριβώς 4.90 eV, τα άτομα απορροφούν όλη την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων, η οποία πρακτικά μηδενίζεται. Στην τελευταία περίπτωση, τα άτομα Hg διεγείρονται σε μια κατάσταση με ενέργεια υψηλότερη από τη θεμελιώδη κατά 4,90 eV. Όμως, η κατάσταση αυτή δεν διαρκεί πολύ, καθώς γρήγορα τα άτομα αποδιεγείρονται προς τη θεμελιώδη, εκπέμποντας από ένα φωτόνιο με ενέργεια 4,90 eV.

6.2.2. Το άτομο του Ne

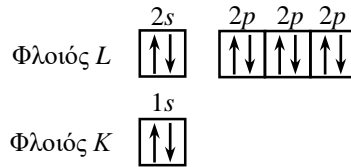
Στην παρούσα άσκηση το πείραμα διεξάγεται σε άτομα Ne και όχι σε ατμούς Hg, όπως στα πειράματα των Franck και Hertz. Παρά την ιστορική σημασία των πειραμάτων αυτών, η λυχνία Hg έχει τα εξής μειονεκτήματα:

- Η πίεση των ατμών Hg αποκτά την επιθυμητή τιμή μόνο όταν η θερμοκρασία της λυχνίας (που περιέχει μία μικρή σταγόνα υδραργύρου στο εσωτερικό της) είναι 210 °C, επομένως απαιτείται φούρνος θέρμανσης.
- Η λυχνία εισάγεται στον φούρνο, οπότε τα φαινόμενα που διαδραματίζονται στο εσωτερικό της δεν είναι ορατά.
- Η άνοδος της θερμοκρασίας στον φούρνο διαρκεί 30 λεπτά.
- Η τιμή της κρίσιμης ενέργειας (4,9 eV) είναι σχετικά μικρή και συγκρίσιμη με τα δυναμικά επαφής δύο μετάλλων, που είναι της τάξης των 2-3 V.

Αντιθέτως, η λυχνία Ne δεν απαιτεί θέρμανση, η αποδιέγερση της δεύτερης στάθμης των ατόμων συνοδεύεται με εκπομπή ορατού φωτός, η δε πρώτη ενέργεια διέγερσης είναι 16,7 eV, δηλαδή πολύ μεγαλύτερη και συνεπώς ευκολότερα μετρήσιμη με ικανοποιητική ακρίβεια. Για να γίνει κατανοητή η διαδικασία διέγερσης των ατόμων Ne, απαιτείται η γνώση του ενεργειακού του διαγράμματος (Σχ. 6.2).

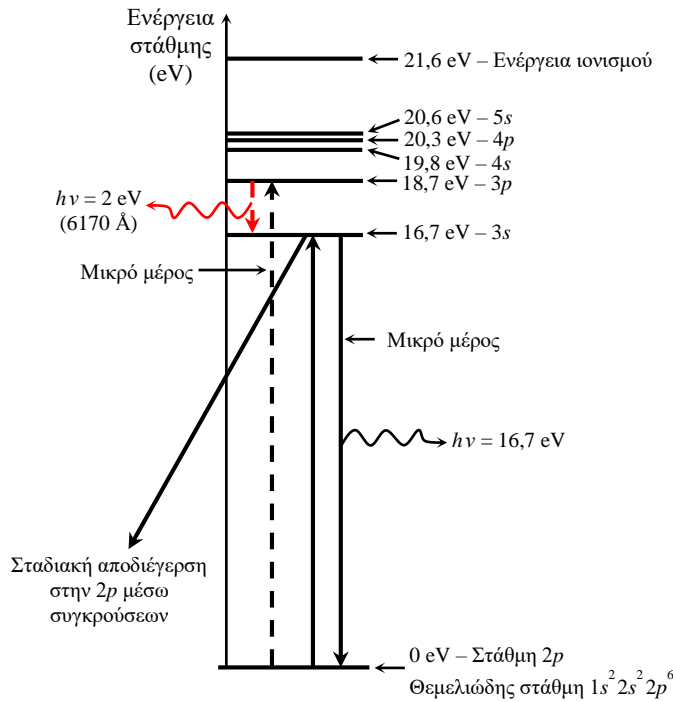
Το άτομο του Ne έχει ατομικό αριθμό $Z = 10$, επομένως έχει 10 ηλεκτρόνια που καταλαμβάνουν πλήρως τους φλοιούς K και L . Δύο ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν τον φλοιό K σε κατάσταση $1s$. Τα υπόλοιπα 8 ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν τον φλοιό L , αλλά στον φλοιό αυτό μόνο 2 ηλεκτρόνια είναι σε κατάσταση $2s$, ενώ τα άλλα 6 ηλεκτρόνια βρίσκονται σε κατάσταση $2p$. Συνεπώς, τα 10 ηλεκτρόνια του Ne είναι τοποθετημένα σε τροχιακά όπως στο Σχ. 6.1.

Έτσι, η δομή της θεμελιώδους κατάστασης είναι $1s^2 2s^2 2p^6$, όπου οι δείκτες συμβολίζουν τον αριθμό των ηλεκτρονίων που βρίσκονται σε κατάσταση s ή p , οι αριθμοί 1, 2 κ.λπ. συμβολίζουν τον κύριο κβαντικό αριθμό n , ενώ ο κβαντικός αριθμός της τροχιακής στροφορμής l συμβολίζεται με τα γράμματα s, p, d, f κ.λπ. ($s: l = 0, p: l = 1, d: l = 2, f: l = 3$). Τα βελάκια στο Σχ. 6.1 συμβολίζουν τα spin των ηλεκτρονίων.



Σχήμα 6.1. Η κατάσταση των ηλεκτρονίων στη θεμελιώδη στάθμη του ατόμου Ne.

Η μεταπήδηση ενός από τα 6 ηλεκτρόνια που βρίσκονται στον υποφλοιό 2p στη στάθμη 3s αντιστοιχεί σε διέγερση στην πρώτη διεγερμένη στάθμη, η μεταπήδηση στη στάθμη 3p αντιστοιχεί στη δεύτερη διεγερμένη στάθμη κ.ο.κ. (Σχ. 6.2).



Σχήμα 6.2. Ενεργειακό διάγραμμα των σταθμών του ατόμου Ne. Οι ενέργειες διέγερσης που εμφανίζονται στο σχήμα αφορούν τα ηλεκτρόνια που διεγείρονται από τον υποφλοιό 2p της θεμελιώδους στάθμης.

Στο πείραμα, η συντριπτική πλειοψηφία των ατόμων Ne διεγείρεται στη στάθμη 3s, που έχει τη μικρότερη ενέργεια διέγερσης, 16,7 eV. Επομένως, αυτή η τιμή θα εκδηλώνεται στις πειραματικές μετρήσεις. Ένα μέρος των διεγερμένων ατόμων αποδιεγείρεται εκπέμποντας φωτόνια με ενέργειες 16,7 eV. Το φάσμα αυτών των φωτονίων βρίσκεται στην περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας, η οποία δεν είναι ορατή. Λόγω μεγάλης συγκέντρωσης των ατόμων Ne στη λυχνία, το μεγαλύτερο μέρος των διεγερμένων ατόμων αποδιεγείρεται από τη στάθμη αυτή μέσω συγκρούσεων με τα μη διεγερμένα άτομα ή με τα εσωτερικά μέρη και τοιχώματα της λυχνίας, μεταφέροντας σε αυτά μέρος της ενέργειάς τους. Η αποδιέγερση αυτού του είδους γίνεται σε πολλά στάδια και δεν συνοδεύεται από εκπομπή φωτός.

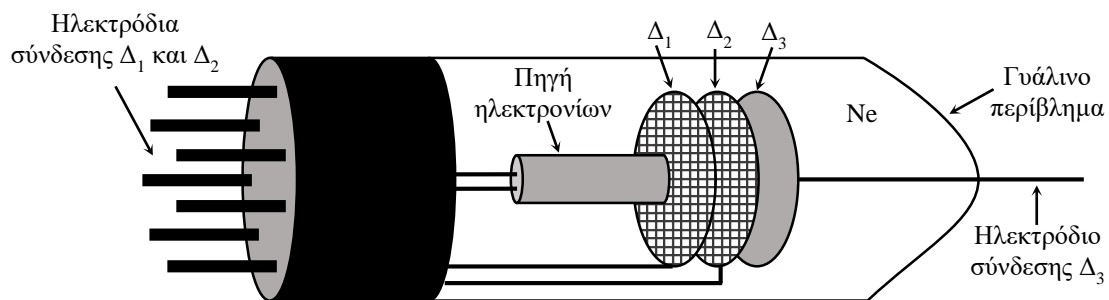
Καθώς η σύγκρουση του ηλεκτρονίου με το άτομο είναι τυχαίο γεγονός, ένα μικρό μέρος των ηλεκτρονίων διεγείρει τα άτομα, όχι στην αμέσως επόμενη στάθμη, αλλά στη μεθεπόμενη, στην 3p, που έχει ενέργεια διέγερσης 18,7 eV (διακεκομμένη γραμμή στο Σχ. 6.2). Η αποδιέγερση και αυτής της στάθμης γίνεται, εν γένει, όπως της προηγούμενης, αλλά ένα μικρό μέρος αυτών των διεγερμένων ατόμων ακολουθεί τη διαδρομή $3p \rightarrow 3s \rightarrow 2p$. Η διαδρομή $3p \rightarrow 3s$ (κόκκινη γραμμή στο Σχ. 6.2) συνοδεύεται από εκπομπή φωτονίων, οι ενέργειες των

οποίων είναι 2 eV και το μήκος κύματος είναι ίσο με 6170 Å, που ανήκει στην περιοχή του ορατού φάσματος, στο χρώμα του ανοιχτού ερυθρού. Έτσι, κατά τη διάρκεια του πειράματος, αυτές οι αποδιεγέρσεις μπορούν να παρατηρηθούν διά γυμνού οφθαλμού, αρκεί στο εργαστήριο να υπάρχει σχετική συσκότιση.

6.3. Μέθοδος

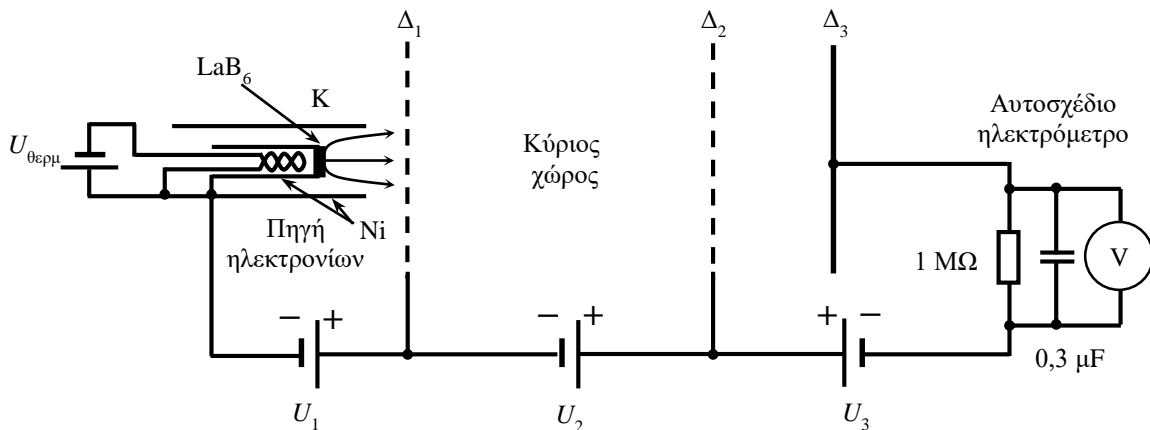
6.3.1. Η λυχνία Ne

Η λυχνία της άσκησης, που απεικονίζεται στο Σχ. 6.3, περιέχει αέριο Ne υπό πίεση 10 mbar (7,5 Torr). Η λυχνία περιέχει μία θερμαινόμενη κάθοδο, K (πηγή ηλεκτρονίων), δύο διάτρητους δίσκους, Δ_1 και Δ_2 , από νικέλιο, καθώς επίσης και έναν συμπαγή δίσκο, Δ_3 , επίσης από νικέλιο.



Σχήμα 6.3. Προοπτική παράσταση της λυχνία Ne της άσκησης.

Στο Σχ. 6.4 απεικονίζονται, σε τομή, τα βασικότερα μέρη της λυχνίας, καθώς και η τροφοδότηση των ηλεκτροδίων της με διάφορες τάσεις.



Σχήμα 6.4. Η τροφοδότηση των ηλεκτροδίων της λυχνία Ne.

Ο χώρος της λυχνίας χωρίζεται σε τρία βασικά μέρη, τα οποία θα εξεταστούν ακολούθως.

6.3.1.1 Πηγή ελεύθερων ηλεκτρονίων (Κάθοδος)

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από μια θερμή επιφάνεια, που συνηθίζεται να ονομάζεται κάθοδος. Στις συσκευές υψηλού κενού η κάθοδος αποτελείται από ένα λεπτό στρώμα οξειδίου του Βαρίου (BaO), ενώ σε συσκευές με γόμωση κάποιου αερίου προτιμάται το εξαβορικό λανθάνιο (LaB_6). Όταν το στρώμα του LaB_6 θερμαίνεται, από την επιφάνειά του παρατηρείται έντονη θερμονική εκπομπή ηλεκτρονίων. Το στρώμα του LaB_6 βρίσκεται στη βάση ενός λεπτού μεταλλικού κοίλου κυλίνδρου από νικέλιο (Ni), εντός του οποίου υπάρχει

ένα θερμαντικό στοιχείο υπό μορφή σπιδάλ. Μια συνεχής τάση των 6,3 V θερμαίνει το σπιδάλ και, ακολούθως, το LaB₆. Η κάθοδος αυτού του τύπου ονομάζεται κάθοδος έμμεσης θέρμανσης και χρησιμοποιείται στις οθόνες των παλμογράφων, τηλεοράσεων και υπολογιστών.

Επειδή η διάμετρος της καθόδου είναι πολύ μικρή, μόλις 1,5 mm, για να απλωθεί η δέσμη των ηλεκτρονίων η κάθοδος είναι τοποθετημένη στο κέντρο ενός άλλου μεταλλικού κοίλου κυλίνδρου, από νικέλιο και αυτός, με διάμετρο 10 mm. Η κάθοδος είναι βυθισμένη κατά 2 mm ως προς τον εξωτερικό κύλινδρο που την περιβάλλει. Έτσι, όταν στον δίσκο Δ₁ εφαρμόζεται μια μικρή (2-3 V) θετική τάση U₁, τα ηλεκτρόνια, κινούμενα προς το δίσκο Δ₁ απλώνονται όπως φαίνεται στο Σχ. 6.4.

Ωστόσο, κύρια αποστολή της πηγής τάσης U₁ είναι να εξουδετερώνει το αρνητικό δυναμικό επαφής που δημιουργείται μεταξύ LaB₆ και Ni, που είναι περίπου 1,8 V (βλ. Π6.1, στο Παράρτημα, στο τέλος της άσκησης) και να εισάγει τα ηλεκτρόνια στον κύριο χώρο της λυχνίας με περίπου μηδενικές αρχικές ενέργειες. Έτσι, καθώς τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της καθόδου έλκονται από τον θετικά πολωμένο διάτρητο δίσκο Δ₁, ένα μέρος τους (25 %) περνάει μέσα από τις οπές του Δ₁ και εισέρχεται στον κύριο χώρο με ενέργειες E₀ = 0,1-0,3 eV, όταν η τάση U₁ ρυθμίζεται να είναι κατά 0,1-0,3 V υψηλότερη από το δυναμικό επαφής. Προφανώς, με τόσο μικρές θετικές τάσεις, το ρεύμα ηλεκτρονίων που εισάγεται στον κύριο χώρο της λυχνίας θα είναι πολύ μικρό (μερικά nA), επομένως ο μετρητής ρεύματος της διάταξης πρέπει να είναι μια πολύ ευαίσθητη συσκευή (βλ. Π6.2).

6.3.1.2 Κύριος χώρος της λυχνίας

Ο χώρος μεταξύ των δύο δίσκων Δ₁ και Δ₂ αποκαλείται κύριος χώρος της λυχνίας, όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επιταχύνονται, αυξάνουν την κινητική τους ενέργεια και συγκρούονται ελαστικά ή ανελαστικά με τα άτομα Ne. Στον κύριο χώρο παρατηρείται και εκπομπή ορατού φωτός, όταν τα ηλεκτρόνια διεγείρουν τη δεύτερη ενεργειακή στάθμη των ατόμων.

Η πηγή τάσης U₂ δημιουργεί ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των διάτρητων δίσκων Δ₁ και Δ₂. Επειδή η διάμετρος των δίσκων είναι 30 mm, ενώ η απόσταση που τους χωρίζει είναι 5 mm, δηλαδή ο λόγος διάμετρος προς απόσταση είναι 6, μπορούμε να πούμε ότι, στην κεντρική περιοχή του κύριου χώρου, το ηλεκτρικό πεδίο είναι ομογενές. Στην περιοχή αυτή τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και αυξάνουν την κινητική τους ενέργεια γραμμικά συναρτήσει της θέσης.

Πράγματι, αγνοώντας τη μικρή παραμόρφωση του πεδίου που δημιουργεί η παρουσία των ελεύθερων ηλεκτρονίων, το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου είναι γραμμική συνάρτηση της θέσης. Έτσι, αν επιλέξουμε τον άξονα x να περνά κάθετα από τα κέντρα των δύο δίσκων, με το μηδέν πάνω στον δίσκο Δ₁, στη θέση x το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου είναι

$$U(x) = \frac{U_2}{d} x \quad (6.2)$$

όπου U₂ είναι η τάση στον δίσκο Δ₂ και d η απόσταση μεταξύ των δίσκων του ιδιόμορφου αυτού επίπεδου πυκνωτή. Συνεπώς, στη θέση x, η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων ισούται με τη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας στο σημείο αυτό, συν την αρχική. Επομένως στη θέση x, η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων είναι

$$E_x = E_0 + e \frac{U_2}{d} x \quad \text{ή} \quad E_x = e \frac{U_2}{d} x \quad \text{όταν} \quad E_0 \approx 0 \quad (6.3)$$

όπου E₀ η αρχική κινητική ενέργεια με την οποία αυτά εισέρχονται στον κύριο χώρο

6.3.1.3 Επιβραδυντικό πεδίο

Στον κύριο χώρο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και κινούνται προς το διάτρητο δίσκο Δ_2 , η διαπερατότητα του οποίου είναι επίσης 25 %. Επομένως, το 75 % των ηλεκτρονίων καταλήγει στην επιφάνεια του Δ_2 , αλλά το υπόλοιπο 25 %, διαπερνά τον δίσκο μέσα από τις οπές και συνεχίζει την κίνησή του προς τον συμπαγή δίσκο Δ_3 .

Στον χώρο μεταξύ Δ_2 και Δ_3 δημιουργείται σκόπιμα ένα επιβραδυντικό ηλεκτρικό πεδίο, όπου οι κινητικές ενέργειες των ηλεκτρονίων μπορούν να μετρηθούν. Το επιβραδυντικό πεδίο δημιουργείται από μια αυτόνομη και ρυθμιζόμενη πηγή τάσης U_3 , ο αρνητικός πόλος της οποίας, μέσω ενός μετρητή ρεύματος, συνδέεται με τον δίσκο Δ_3 , ενώ ο θετικός πόλος συνδέεται με τον δίσκο Δ_2 . Σε σύντομη διατύπωση λέμε ότι στον δίσκο Δ_3 εφαρμόζεται αρνητική τάση U_3 . Με τον τρόπο αυτό αποκόπτονται τα ηλεκτρόνια που εισέρχονται στον χώρο αυτό με ενέργειες μικρότερες από eU_3 .

6.3.2. Το πείραμα

Το πείραμα συνιστάται στην καταγραφή του ρεύματος ηλεκτρονίων που καταφθάνουν στον δίσκο Δ_3 συναρτήσει της τάσης U_2 που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια του κύριου χώρου της λυχνίας.

Στα ομώνυμα πειράματα των Franck και Hertz, η αρνητική τάση U_3 ήταν μόνιμα ρυθμισμένη στα $-0,5$ V. Στα πειράματα με αέριο Ne η τάση αυτή ρυθμίζεται στα -8 V. Σταθερές και αμετάβλητες παραμένουν και άλλες δύο τάσεις: η τάση θέρμανσης της καθόδου, $6,3$ V, και η θετική τάση $U_1 \approx 2-3$ V. Η μόνη τάση που μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι η τάση U_2 (0-80 V). Όπως οι Franck και Hertz, θα υποθέσουμε ότι στις ανελαστικές κρούσεις οι ενέργειες των ελεύθερων ηλεκτρονίων μηδενίζονται.

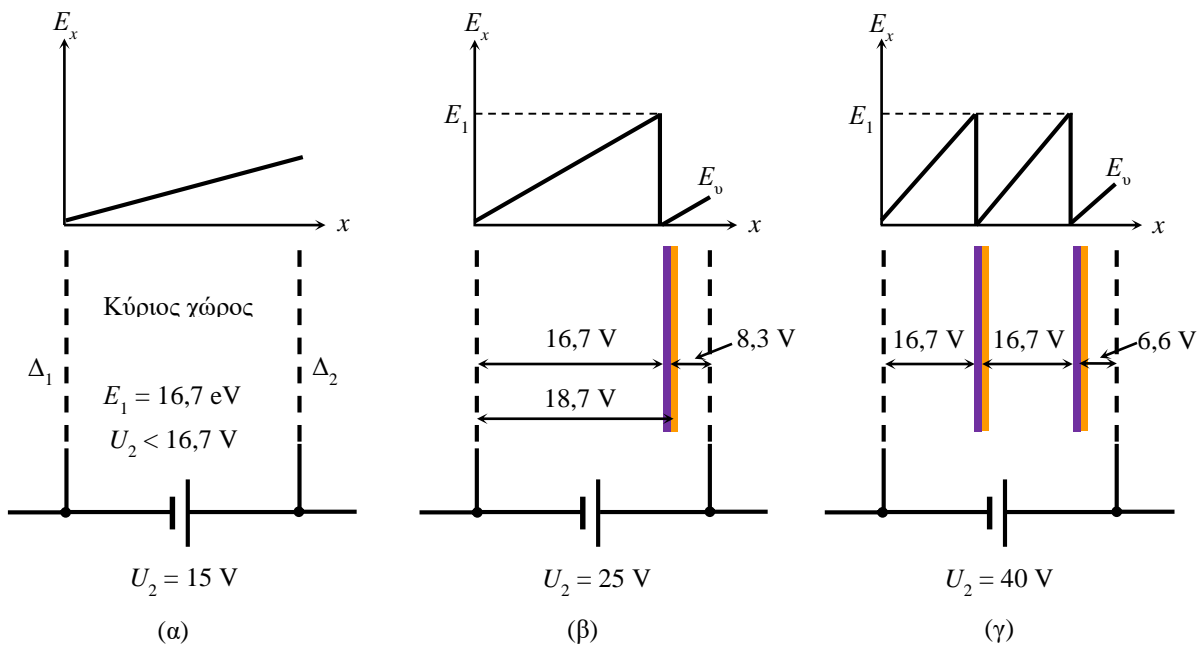
Θα εξετάσουμε ακολούθως πώς η τάση U_2 επηρεάζει το ρεύμα ηλεκτρονίων που καταφθάνει στο συμπαγή δίσκο Δ_3 , λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το ρεύμα έχει μη μηδενική τιμή όταν τα ηλεκτρόνια κινούνται (κάθετα) προς τον συμπαγή δίσκο Δ_3 με ενέργειες άνω των 8 eV. Η ίδια η τιμή του ρεύματος δεν έχει σημασία, αρκεί ο μετρητής να είναι σε θέση να την μετρήσει.

Στο Σχ. 6.5 παρουσιάζονται τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις εξέλιξης της κινητικής ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων κατά μήκος της λυχνίας, για τρεις διαφορετικές τάσεις της πηγής U_2 . Στην ανάλυση που ακολουθεί θα αγνοήσουμε την, μικρή άλλωστε, κινητική ενέργεια E_0 , με την οποία τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εισέρχονται στον κύριο χώρο.

(α) $U_2 = 15$ V

Στην περίπτωση αυτή, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επιταχύνονται στον κύριο χώρο της λυχνίας και αυξάνουν την κινητική τους ενέργεια γραμμικά έως την τιμή 15 eV. Επειδή οι ενέργειές τους είναι μικρότερες ακόμη και από την ενέργεια της πρώτης διεγερμένης στάθμης των ατόμων Ne ($E_1 = 16,7$ eV), οι συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τα άτομα είναι ελαστικές παντού. Το 75 % των ηλεκτρονίων συγκρούεται με την επιφάνεια του διάτρητου δίσκου Δ_2 , ενώ το υπόλοιπο 25 % διέρχεται μέσα από τις οπές και εισέρχεται στον χώρο του επιβραδυντικού πεδίου με ενέργειες 15 eV. Εφόσον το επιβραδυντικό δυναμικό είναι -8 V, αυτά τα ηλεκτρόνια θα συγκρουστούν με τον συμπαγή δίσκο Δ_3 με ενέργειες 7 eV και θα καταμετρηθούν τελικά από τον μετρητή ρεύματος.

Συνεπώς, όταν $8\text{ V} < U_2 < 16,7\text{ V}$, όλα τα ηλεκτρόνια θα καταφθάνουν στον συμπαγή δίσκο και ο μετρητής ρεύματος θα δείχνει μη μηδενική τιμή. Όταν $U_2 < 8\text{ V}$, προφανώς κανένα ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να υπερβεί το απωστικό δυναμικό και ο μετρητής θα δείχνει μηδενική τιμή.



Σχήμα 6.5. Τρεις περιπτώσεις εξέλιξης της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων στον κύριο χώρο της λυχνίας.

(β) $U_2 = 25\text{ V}$

Σε κάποια απόσταση από τον δίσκο Δ_1 το δυναμικό είναι $16,7\text{ V}$, επομένως στο σημείο αυτό οι ενέργειες των ηλεκτρονίων είναι $16,7\text{ eV}$ και τα ηλεκτρόνια συγκρούονται *ανελαστικά* με τα άτομα Ne. Στην περιοχή αυτή οι ενέργειες των περισσότερων ηλεκτρονίων μηδενίζονται και τα άτομα εκπέμπουν υπεριώδη ακτινοβολία που δεν είναι ορατή. Τα ηλεκτρόνια που υπέστησαν ανελαστική κρούση θα επιταχυνθούν εκ νέου και λίγο πριν από τη σύγκρουση με τον δίσκο Δ_2 θα αποκτήσουν κινητική ενέργεια $E_v = 25\text{ eV} - 16,7\text{ eV} = 8,3\text{ eV}$. Επειδή τα ηλεκτρόνια με αυτή την ενέργεια μπορούν να διαπεράσουν την επιβραδυντική τάση των -8 V , θα συγκρουστούν με τον συμπαγή δίσκο με ενέργειες $0,3\text{ eV}$ και θα καταμετρηθούν από τον μετρητή ρεύματος.

Καθώς η σύγκρουση του ηλεκτρονίου με το άτομο είναι τυχαίο γεγονός, ένα μικρό μέρος των ηλεκτρονίων με ενέργειες $16,7\text{ eV}$ κατορθώνουν να αποφύγουν τη σύγκρουση και αποκτούν ενέργειες $18,7\text{ eV}$. Αν τώρα σε αυτή την περιοχή τα ηλεκτρόνια συγκρουστούν με κάποια άτομα Ne, αυτά θα διεγερθούν στη στάθμη $3p$, η σταδιακή αποδιέγερση της οποίας συνοδεύεται από εκπομπή ορατού φωτός. Επομένως, ο χώρος όπου γίνονται οι ανελαστικές κρούσεις δεν συμπίπτει με την περιοχή όπου παρατηρείται εκπομπή αμυδρού ορατού φωτός.

Συνεπώς, όταν $U_2 = 25\text{ V}$, ο μετρητής ρεύματος θα δείχνει μη μηδενική τιμή και αναμένουμε μία λεπτή φωτεινή περιοχή στον κύριο χώρο της λυχνίας.

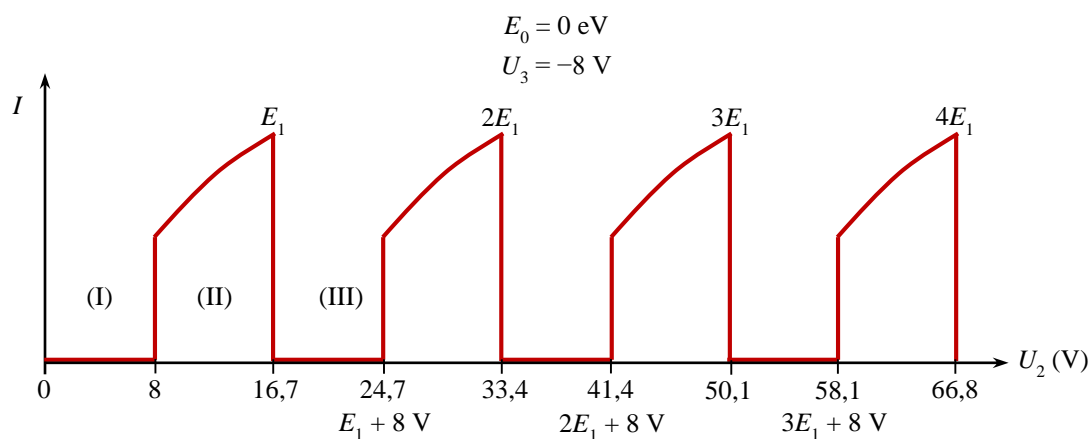
(β) $U_2 = 40\text{ V}$

Όταν η τάση U_2 είναι λίγο μεγαλύτερη από $2E_1$, στον κύριο χώρο υπάρχουν δύο περιοχές όπου οι συγκρούσεις είναι ανελαστικές, στα σημεία όπου το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου είναι $16,7\text{ V}$ και $33,4\text{ V}$. Τα ηλεκτρόνια θα συγκρουστούν με τον δίσκο Δ_2 με ενέργειες $E_v = 6,6\text{ eV}$,

που αποκτούν στο διάστημα της τρίτης επιτάχυνσης. Το 25 % αυτών των ηλεκτρονίων διέρχεται μέσα από τις οπές και εισέρχεται στον χώρο του επιβραδυντικού πεδίου με ενέργειες 6,6 eV. Τα ηλεκτρόνια αυτά δεν μπορούν να υπερβούν το απωστικό δυναμικό των 8 V, έτσι δεν θα καταμετρηθούν.

Συνεπώς, όταν $U_2 = 40$ V, ο μετρητής ρεύματος θα δείχνει μηδενική τιμή και αναμένουμε δύο λεπτές φωτεινές περιοχές στον κύριο χώρο της λυχνίας.

Βάσει των παραπάνω, μπορούμε τώρα να κατασκευάσουμε την αναμενόμενη συνάρτηση ρεύματος-τάσης σε ολόκληρο το φάσμα της τάσης U_2 (0-70 V), η οποία δίνεται στο Σχ. 6.6.



Σχήμα 6.6. Η αναμενόμενη συνάρτηση ρεύματος-τάσης στη λυχνία Ne.

Διαπιστώνουμε τα ακόλουθα:

- Όταν $U_2 < 8$ V (Περιοχή I), κανένα ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να φτάσει στον συμπαγή δίσκο Δ_3 , επομένως ο μετρητής ρεύματος θα δείχνει μηδενική τιμή.
- Όταν 8 V $< U_2 < 16,7$ V (Περιοχή II), οι ενέργειες των ηλεκτρονίων τούς επιτρέπουν να υπερβούν το απωστικό δυναμικό, οπότε όσα κινούνται κάθετα προς τους δίσκους θα καταφθάνουν στον δίσκο Δ_3 και ο μετρητής ρεύματος θα δείξει μια μη μηδενική τιμή. Η αύξηση της τάσης U_2 θα συνοδεύεται με ελαφρά αύξηση του ρεύματος, με τάση κορεσμού του.
- Όταν $U_2 = 16,7$ V, το ρεύμα του μετρητή θα μηδενιστεί απότομα, καθώς οι ανελαστικές κρούσεις συμβαίνουν σχεδόν πάνω στην επιφάνεια του δίσκου Δ_2 , οπότε τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να εισέλθουν στον χώρο του επιβραδυντικού πεδίου και τελικά καταλήγουν στον δίσκο Δ_2 . Γενικά, το ρεύμα μηδενίζεται όταν

$$U_2 = k \frac{E_1}{e} \quad (6.4)$$

όπου $E_1 = 16,7$ eV και $k = 1, 2, 3, 4, \dots$

- Το ρεύμα θα παραμένει μηδέν και στην Περιοχή III, δηλαδή στο διάστημα μεταξύ E_1/e και $E_1/e + 8$ V (16,7-24,7 V), καθώς στη δεύτερη επιτάχυνση τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να αποκτήσουν ενέργειες μεγαλύτερες από 8 eV, ώστε να εισχωρήσουν βαθιά στον χώρο του επιβραδυντικού πεδίου και να φτάσουν στην επιφάνεια του συμπαγούς δίσκου Δ_3 , και τελικά θα επιστρέψουν στον δίσκο Δ_2 .

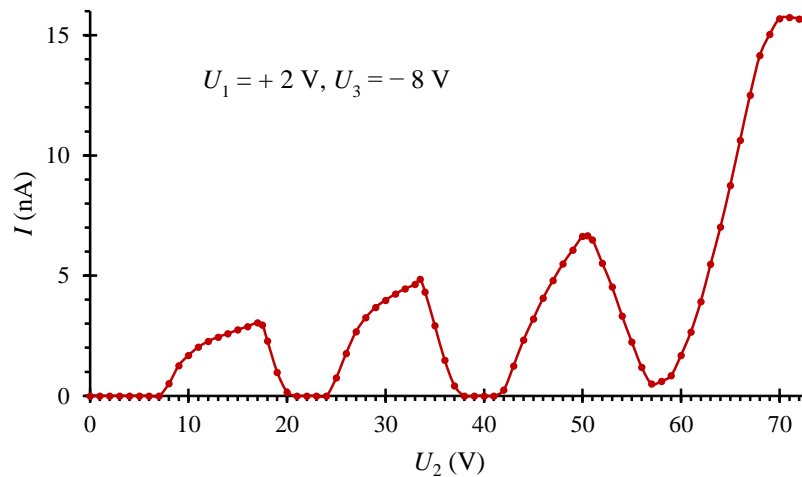
- Το ρεύμα στον μετρητή θα ξεκινήσει και πάλι μόνο όταν τα εισερχόμενα στο επιβραδυντικό πεδίο ηλεκτρόνια έχουν κινητικές ενέργειες ίσες ή μεγαλύτερες από 8 eV. Αυτό θα συμβεί όταν $U_2 \geq E_1/e + U_3$, όπου $U_3 = 8$ V. Γενικά, το ρεύμα ξεκινά κάθε φορά στα σημεία όπου

$$U_2 = k \frac{E_1}{e} + U_3 \quad (6.5)$$

όπου $E_1 = 16,7$ eV και $k = 1, 2, 3, 4, \dots$

Η Εξ. (6.5) είναι σημαντική διότι επιτρέπει τον πειραματικό έλεγχο της υπόθεσης περί μηδενισμού της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων στις ανελαστικές κρούσεις. Αν οι πειραματικές μετρήσεις επιβεβαιώσουν αυτή τη σχέση, δηλαδή το ρεύμα έχει μηδενική τιμή στην Περιοχή III και ξεκινά πάλι όταν $U_2 = E_1/e + 8$ V = 24,7 V, αυτό θα αποδεικνύει ότι στον χώρο όπου γίνονται οι ανελαστικές κρούσεις οι ενέργειες των ηλεκτρονίων μηδενίζονται.

Στο Σχ. 6.7 δίνεται μια πειραματική καμπύλη ρεύματος-τάσης ενός πειράματος Franck-Hertz με λυχνία Ne. Σε γενικές γραμμές, η πειραματική καμπύλη ακολουθεί την αναμενόμενη (Σχ. 6.6), όμως διαπιστώνονται δύο σημαντικές διαφορές: τα ύψη των κορυφών δεν είναι σταθερά και αυξάνονται με την U_2 , ενώ ο μηδενισμός του ρεύματος δεν είναι απότομος. Στο Παράτημα (Π6.3) αναλύονται οι δύο παράγοντες που εξηγούν αυτές τις διαφορές, δηλαδή ο ιονισμός των ατόμων Ne και η ανομοιογένεια του ηλεκτρικού πεδίου πάνω στον διάτρητο δίσκο Δ_2 .



Σχήμα 6.7. Πειραματική καμπύλη ρεύματος-τάσης στη λυχνία Ne.

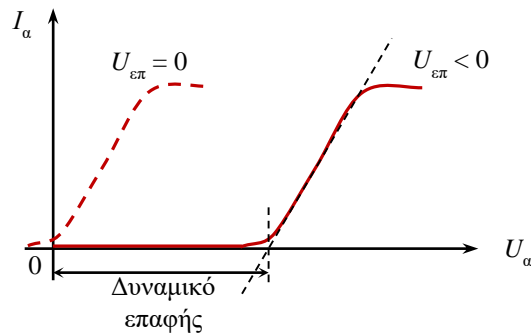
6.3.3 Μέτρηση του δυναμικού επαφής δύο μετάλλων

Στη λυχνία Ne της άσκησης η κάθοδος είναι κατασκευασμένη από LaB_6 και βρίσκεται σε επαφή με έναν κύλινδρο από Ni, αλλά και με τον δίσκο Δ_1 , επίσης από Ni, συνεπώς θα αναπτυχθεί μεταξύ τους εξωτερικό **δυναμικό επαφής** $U_{\text{επ}}$, το οποίο θα ισούται με τη διαφορά των δύο έργων εξόδου (βλ. Π6.1):

$$U_{\text{επ}} = \varphi_{\text{LaB}_6} - \varphi_{\text{Ni}} = 2,68 - 4,50 = -1,82$$
 V (6.6)

Σε μια διάταξη θερμιονικής εκπομπής, όπως η δίοδος κενού, το δυναμικό επαφής μπορεί να μετρηθεί και για το σκοπό αυτό καταγράφεται και σχεδιάζεται η συνάρτηση ρεύματος-τάσης της διόδου (Σχ. 6.8). Αν το δυναμικό επαφής είναι μηδέν, η αύξηση του ανοδικού ρεύματος I_a θα αρχίσει από τις μηδενικές τιμές της ανοδικής τάσης U_a , σύμφωνα με τον νόμο του Langmuir ή νόμο των «3/2» (βλ. Άσκηση 31, «Θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων»). Στην περίπτωση όμως που $U_{\text{επ}} < 0$, όπως στην άσκηση, το ανοδικό ρεύμα θα έχει μηδενική τιμή όσο $U_a \leq U_{\text{επ}}$

και θα αρχίσει να αυξάνει μόνο όταν $U_a \geq U_{επ}$. Επομένως, το δυναμικό επαφής μετατοπίζει την καμπύλη προς τις θετικές τιμές της ανοδικής τάσης. Στην αντίθετη περίπτωση ($U_{επ} > 0$), η καμπύλη μετατοπίζεται προς τις αρνητικές τιμές της ανοδικής τάσης. Μετρώντας πάνω στο διάγραμμα αυτή τη μετατόπιση, προκύπτει το δυναμικό επαφής.



Σχήμα 6.8. Μετατόπιση της καμπύλης ρεύματος-τάσης λόγω αρνητικού δυναμικού επαφής.

Θεωρητικά, για την καταγραφή αυτής της καμπύλης, απαιτείται μια δίοδος με κάθοδο από LaB_6 και άνοδο από Ni , ενώ το θερμοϊονικό ρεύμα πρέπει να μετριέται στην άνοδο, δηλαδή ο μετρητής ρεύματος πρέπει να βρίσκεται μεταξύ του δίσκου Δ_1 και του θετικού πόλου της πηγής τάσης U_1 στο Σχ. 6.4. Η διάταξη τη άσκησης δεν προσφέρει αυτή τη δυνατότητα, καθώς το ρεύμα μπορεί να μετρηθεί μόνο στην έξοδο του συμπαγούς δίσκου Δ_3 . Ωστόσο, αντί του ολικού ρεύματος ηλεκτρονίων που καταφθάνουν στον Δ_1 , μπορεί να μετρηθεί μέρος του (25 %) που διέρχεται μέσα από τις οπές και είναι ανάλογο του ολικού. Για να διέλθουν αυτά τα ηλεκτρόνια από τον δεύτερο διάτρητο δίσκο Δ_2 και να καταλήξουν στον Δ_3 , όπου βρίσκεται ο μετρητής, πρέπει να υποβοηθηθούν με μια μικρή θετική τάση U_2 μεταξύ των δύο διάτρητων δίσκων, αλλά και να μηδενιστεί το απωστικό δυναμικό U_3 στον Δ_3 (βλ. Σχ. 6.4)

6.4. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη (Σχ. 6.3 και 6.4) αποτελείται από ένα κιβώτιο-βάση όπου εισάγεται και στηρίζεται η λυχνία Ne (Σχ. 6.9.α). Στο εσωτερικό του κιβωτίου είναι ενσωματωμένες τέσσερις αυτόνομες πηγές τάσης, εκ των οποίων οι τρεις είναι ρυθμιζόμενες. Η διάταξη περιλαμβάνει ακόμη ένα ψηφιακό βολτόμετρο, για τη μέτρηση και ρύθμιση των τάσεων, και ένα ψηφιακό αυτοσχέδιο ηλεκτρόμετρο (νανοαμπερόμετρο, βλ. Π6.3), για τη μέτρηση του ρεύματος των ηλεκτρονίων που καταφθάνουν στον συμπαγή δίσκο Δ_3 .



(α)



(β)

Σχήμα 6.9. (α) Το κιβώτιο-βάση με τη λυχνία Ne . (β) Οι φωτεινές ζώνες μέσα στη λυχνία Ne .

Βιβλιογραφία

1. H. D. Young, R. A. Freedman, *Πανεπιστημιακή Φυσική με Σύγχρονη Φυσική*, Τόμος Β': *Ηλεκτρομαγνητισμός – Οπτική – Σύγχρονη Φυσική* (Αθήνα, ⁴2022), 39.3.
2. A. C. Melissinos, J. Napolitano, *Experiments in Modern Physics* (San Diego, ²2003), σ. 10-19.
3. D. W. Preston, E. R. Dietz, *The Art of Experimental Physics* (New York, 1991), σ. 197-209.
4. ΕΜΠ, Τομέας Φυσικής, ΣΕΜΦΕ, *Εργαστηριακές Ασκήσεις Φυσικής*, Τόμος ΙΙ (Αθήνα, 2011), σ. 191-207, 341-352.

6.5. Εκτέλεση

Στην άσκηση αυτή θα γίνουν δύο πειράματα.

- Στο **πρώτο πείραμα** θα μετρηθεί το δυναμικό επαφής του συστήματος $\text{LaB}_6\text{-Ni}$. Η μέτρηση αυτή επιτρέπει τον υπολογισμό της αρχικής ενέργειας E_0 , με την οποία τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στον κύριο χώρο της λυχνίας, όταν $U_1 = 2,00 \text{ V}$.
- Στο **δεύτερο πείραμα** θα προσδιοριστεί η κρίσιμη ενέργεια διέγερσης E_1 και θα ελεγχθεί πειραματικά η υπόθεση περί μηδενισμού της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων στις ανελαστικές κρούσεις. Η ενέργεια E_1 θα μετρηθεί μέσω καταγραφής του ρεύματος των ηλεκτρονίων που καταφθάνουν στον συμπαγή δίσκο Δ_3 ως συνάρτηση της τάσης U_2 που εφαρμόζεται στον κύριο χώρο της λυχνίας (καμπύλη ρεύματος-τάσης, Σχ. 6.7).

6.5.1. Μέτρηση του δυναμικού επαφής $\text{LaB}_6\text{-Ni}$

1. Αναγνωρίστε τα όργανα και θέστε σε λειτουργία το κιβώτιο τροφοδοσίας της λυχνίας. Αυτόματα αρχίζει η θέρμανση της καθόδου της λυχνίας. Περιμένετε 3-4 λεπτά, έως ότου σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία της καθόδου.
2. Βεβαιωθείτε ότι όλες οι τάσεις είναι ρυθμισμένες στο μηδέν.
3. Συνδέοντας το ψηφιακό βολτόμετρο στις κατάλληλες υποδοχές, ρυθμίστε τη βοηθητική τάση $U_2 = 2,00 \text{ V}$ και την $U_3 = 0 \text{ V}$.
4. Μετρήστε το ρεύμα ηλεκτρονίων I που καταφθάνουν στον συμπαγή δίσκο Δ_3 ως συνάρτηση της τάσης U_1 , στο διάστημα 0-3 V, με βήμα 0,1 V. Στο πείραμα αυτό η συσκότιση δεν είναι απαραίτητη.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Αντιγράψτε τα ψηφία που βλέπετε στην οθόνη του μετρητή σε μονάδες nA (βλ. Π6.2.1).

6.5.2. Καταγραφή της καμπύλης ρεύματος-τάσης

1. Ρυθμίστε την τάση $U_1 = 2,00 \text{ V}$ και την τάση $U_3 = -8,00 \text{ V}$.
2. Πριν ξεκινήσετε την καταγραφή, αυξήστε την τάση U_2 από 0 έως 80 V, παρατηρώντας τα φαινόμενα που διαδραματίζονται στον κύριο χώρο της λυχνίας. Θα παρατηρήσετε ότι, καθώς η τάση U_2 αυξάνει, θα εμφανιστούν διαδοχικά τρεις φωτεινές ζώνες (βλ. Σχ. 6.9.β). Εδώ είναι απαραίτητη μερική συσκότιση. Ακολουθώντας, μηδενίστε αργά την τάση U_2 .

3. Στο διάστημα 0 έως 80 V, καταγράψτε το ρεύμα I των ηλεκτρονίων που καταφθάνουν στον συμπαγή δίσκο Δ_3 ως συνάρτηση της τάσης U_2 , με βήμα 1 V, που θα μειωθεί σε 0,5 V στις περιοχές όπου εμφανίζονται τα μέγιστα του ρεύματος. Και γι' αυτό το πείραμα η συσκότιση δεν είναι απαραίτητη.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Όταν αλλάζετε την τάση U_2 , περιμένετε να περάσουν 1,5-2 δευτερόλεπτα πριν σημειώσετε την τιμή του ρεύματος, I (βλ. Π6.2.2).

4. Ρυθμίστε όλες τις τάσεις στο μηδέν και κλείστε την τροφοδοσία του κιβωτίου. Επίσης, κλείστε και τα δύο ψηφιακά πολύμετρα, για να μην αδειάσουν οι μπαταρίες τους.

6.6. Επεξεργασία των μετρήσεων

6.6.1. Μέτρηση του δυναμικού επαφής LaB_6-Ni

1. Σχεδιάστε τη γραφική παράσταση του ρεύματος I ως συνάρτηση της τάσης U_1 .
2. Από τη γραφική παράσταση προσδιορίστε το δυναμικό επαφής του συστήματος LaB_6-Ni (σε V) και συγκρίνετε την τιμή αυτή με τη θεωρητική (1,82 V).
3. Υπολογίστε (εκτιμήστε) την αρχική ενέργεια E_0 με την οποία τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στον κύριο χώρο της λυχνίας κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειράματος, όταν $U_1 = 2,00$ V.

6.6.2. Προσδιορισμός της ενέργειας διέγερσης E_1 του ατόμου Ne

1. Σχολιάστε σύντομα τα φαινόμενα που παρατηρήσατε στον κύριο χώρο, καθώς η τάση U_2 αυξανόταν στο διάστημα 0-80 V.
2. Σχεδιάστε τη γραφική παράσταση $I = f(U_2)$ και, από αυτήν, υπολογίστε την ενέργεια διέγερσης $E_1 \pm \delta E_1$.
3. Εξηγήστε πώς προκύπτει από τις πειραματικές μετρήσεις σας το συμπέρασμα ότι στις ανελαστικές κρούσεις των ηλεκτρονίων με τα άτομα οι κινητικές ενέργειες των ηλεκτρονίων μηδενίζονται.
4. Η καμπύλη $I = f(U_2)$ που σχεδιάσατε διαφέρει από την αναμενόμενη (Σχ. 6.6). Εξηγήστε τους παράγοντες που ευθύνονται γι' αυτό.
5. Μετά την πρώτη κορυφή, το ρεύμα δεν μηδενίζεται απότομα. Από το εύρος της περιοχής μηδενισμού, υπολογίστε τη διαφορά δυναμικού που υπάρχει μεταξύ των κέντρων των οπών και της μεταλλικής επιφάνειας του διάτρητου δίσκου Δ_2 .
6. Ο μετρητής συστηματικά παρουσιάζει αυξημένες τιμές του ρεύματος κατά 100 %, π.χ. δείχνει 4 nA, ενώ η πραγματική τιμή είναι 2 nA. Πόσο θα επηρεάσει την ακρίβεια μέτρησης της E_1 το γεγονός αυτό;

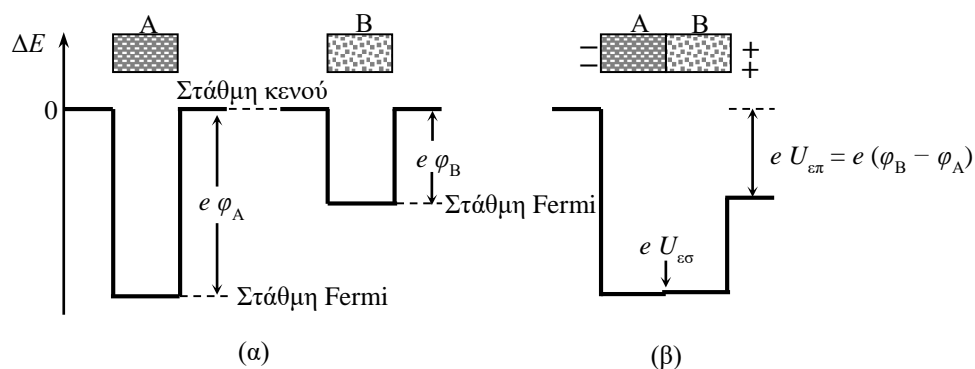
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Η ενέργεια διέγερσης E_1 μετριέται από τη γραφική παράσταση, επομένως το σφάλμα της θα εκτιμηθεί επίσης από τη γραφική παράσταση. Το σφάλμα του ψηφιακού μετρητή τάσης (της U_2) είναι 0,7 % + 3D, όπου D είναι η μονάδα της τελευταίας δεκαδικής τάξης της παριστάμενης στην οθόνη τιμής.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ (Π6)

Π6.1. Εξωτερικό δυναμικό επαφής δύο μετάλλων

Όταν δύο διαφορετικά μέταλλα έρχονται σε επαφή, στο σημείο της επαφής δημιουργείται μια μικρή διαφορά δυναμικού, το λεγόμενο **εσωτερικό δυναμικό επαφής** (ή δυναμικό Peltier, βλ. Άσκηση 34, «Βαθμονόμηση θερμοζεύγους»), η τιμή του οποίου είναι της τάξης των 1-10 mV. Διαφορά δυναμικού δημιουργείται και μεταξύ των ελεύθερων άκρων των δύο μετάλλων, μόνο που η διαφορά αυτή είναι εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη από την προηγούμενη και είναι μερικά βολτ! Η τάση που δημιουργείται στα ελεύθερα άκρα των δύο μετάλλων ονομάζεται **εξωτερική διαφορά δυναμικού επαφής**. Ας δούμε πώς αυτή δημιουργείται.

Έστω ότι έχουμε δύο μέταλλα: το μέταλλο A και το μέταλλο B, με φ_A και φ_B τα έργα εξόδου των ηλεκτρονίων από τα μέταλλα αυτά, αντίστοιχα. Έστω ακόμη ότι τα μέταλλα, πριν έρθουν σε επαφή, δεν ήταν ηλεκτρικά φορτισμένα. Στο Σχ. Π6.1 παρουσιάζεται η δυναμική ενέργεια ενός ηλεκτρονίου μέσα και έξω από τα μέταλλα, πριν αυτά έλθουν σε επαφή και μετά. Η δυναμική ενέργεια του ηλεκτρονίου έξω από τα μέταλλα ορίζεται ως μηδενική. Το ουσιώδες εδώ είναι ότι, όταν τα μέταλλα έρθουν σε επαφή, οι πυθμένες των πηγαδιών δυναμικού, δηλαδή η στάθμη Fermi των δύο μετάλλων, αποκτούν ενιαία τιμή, ενώ πριν από την επαφή οι στάθμες αυτές διέφεραν.



Σχήμα Π6.1. Η δυναμική ενέργεια ενός ηλεκτρονίου μέσα και έξω από τα μέταλλα A και B. (α) Πριν από την επαφή και (β) μετά την επαφή.

Μετά την επαφή, στο σημείο επαφής δημιουργείται ένα μικρό εσωτερικό σκαλοπάτι δυναμικής ενέργειας (βλ. βέλος στο Σχ. Π6.1.β) που μπορούμε να το αγνοήσουμε, αλλά η δυναμική ενέργεια των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στην εξωτερική επιφάνεια των δύο μετάλλων θα έχει διαφορετική τιμή. Όπως βλέπουμε, η διαφορά αυτή είναι

$$U_{\varepsilon\pi} = \varphi_B - \varphi_A \quad (\text{Π6.1})$$

Έτσι, μεταξύ των ελεύθερων άκρων των δύο μετάλλων θα δημιουργηθεί ηλεκτρικό πεδίο, επομένως αυτά θα φορτιστούν: το μέταλλο που έχει μικρό έργο εξαγωγής με θετικά φορτία, ενώ το άλλο με αρνητικά.

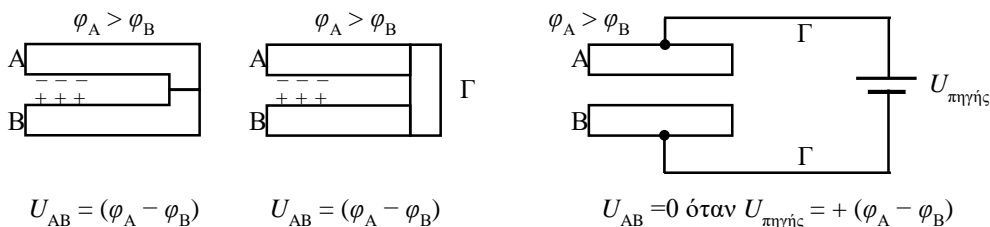
Στη λυχνία Ne της άσκησης η κάθοδος είναι κατασκευασμένη από LaB_6 και βρίσκεται σε επαφή με έναν κύλινδρο από Ni, τα έργα εξόδου των οποίων είναι 2,68 και 4,50 eV, αντίστοιχα. Επομένως, η διαφορά δυναμικού επαφής $\text{LaB}_6\text{-Ni}$ είναι η διαφορά των δύο έργων εξαγωγής:

$$U_{\varepsilon\pi} = \varphi_B - \varphi_A = 2,68 - 4,50 = -1,82 \text{ V} \quad (\text{Π6.2})$$

Σημειώνεται ότι το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο επαφής μεταξύ των μετάλλων Α και Β εξαρτάται μόνο από τα έργα εξόδου των δύο μετάλλων, παρότι στις εφαρμογές μεσολαβεί συνήθως ένα τρίτο μέταλλο (το Γ, στο Σχ. Π6.2). Πράγματι, σε αυτή την περίπτωση η τάση στα ελευθέρα άκρα είναι:

$$U_{AB} = (\varphi_{\Gamma} - \varphi_A) + (\varphi_B - \varphi_{\Gamma}) = \varphi_B - \varphi_A \quad (\text{Π6.3})$$

δηλαδή στα σημεία επαφής του τρίτου μετάλλου τα δυναμικά επαφής αλληλοαναιρούνται.



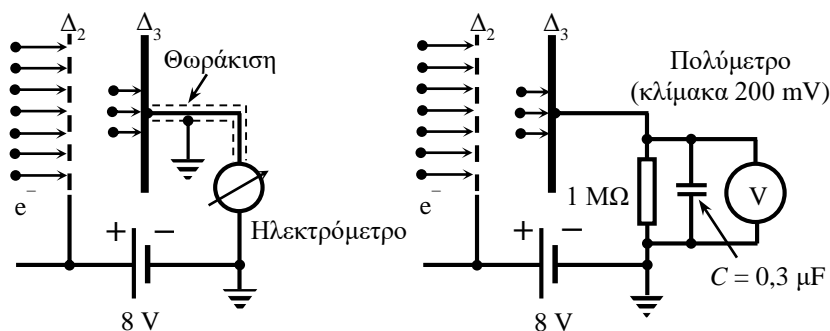
Σχήμα Π6.2. Σύνδεση δύο μετάλλων, Α και Β, με ένα τρίτο μέταλλο, Γ.

Σε πειράματα και σε εφαρμογές, τα ενδιαμέσα μέταλλα μπορούν να είναι περισσότερα του ενός. Είναι εύκολο να δείξει κανείς ότι, όπως στην περίπτωση του μετάλλου Γ, η εξωτερική τάση επαφής των μετάλλων Α και Β εξαρτάται μόνο από τα έργα εξόδου αυτών των μετάλλων, επομένως δεν εξαρτάται από τα έργα εξόδου των ενδιαμέσων μετάλλων.

Π6.2. Το αυτοσχέδιο ηλεκτρόμετρο της άσκησης

Π6.2.1 Συνδεσμολογία και λειτουργία του ηλεκτρομέτρου

Στο πείραμα, ο αριθμός των ηλεκτρονίων που καταφθάνουν στον συμπαγή δίσκο Δ_3 είναι πάρα πολύ μικρός. Έτσι, τα ισοδύναμα ρεύματα είναι της τάξης των $0,1 \sim 10 \text{ nA}$ ($1 \text{ nA} = 10^{-9} \text{ A}$). Με τα κοινά ψηφιακά πολύμετρα είναι αδύνατο να μετρηθούν τόσο μικρά ρεύματα, ακόμα και στην πιο ευαίσθητη κλίμακα των $200 \mu\text{A}$, όπου η διακριτική ικανότητα είναι $0,1 \mu\text{A}$ ή 10^{-7} A . Όμως, οι ανάγκες του πειράματος απαιτούν από τον μετρητή διακριτική ικανότητα της τάξης των $0,1 \text{ nA}$ ή 10^{-10} A . Η μέτρηση τόσο μικρών ρευμάτων γίνεται με ειδικά ηλεκτρονικά όργανα που ονομάζονται ηλεκτρόμετρα (Σχ. Π6.3.α).



Σχήμα Π6.3. Μέτρηση ασθενούς ρεύματος με χρήση (α) ηλεκτρομέτρου και (β) του αυτοσχέδιου ηλεκτρομέτρου της άσκησης.

Ωστόσο, τα όργανα αυτά είναι ακριβά και δυσεύρετα, αλλά το ρεύμα των 10^{-10} A μπορεί να μετρηθεί και με ένα κοινό πολύμετρο, αν αυτό συναρμολογηθεί ως υποτυπώδες αυτοσχέδιο ηλεκτρόμετρο. Να χρησιμοποιήσουμε, δηλαδή, το κοινό πολύμετρο ως μετρητή τάσης και όχι

ρεύματος, μετρώντας την πτώση τάσης που δημιουργεί το μετρούμενο ρεύμα σε μια ειδική αντίσταση, κατά προτίμηση μεγάλης τιμής (Σχ. Π6.3.β). Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας κάθε ηλεκτρομέτρου

Επειδή η εσωτερική αντίσταση του πολυμέτρου της άσκησης είναι 100 MΩ, μπορούμε να επιλέξουμε τη μετρική αντίσταση ίση π.χ. με 1 MΩ. Με την επιλογή αυτή μόνο το 1 % του μετρούμενου ρεύματος θα διακλαδώνεται προς το πολύμετρο, οπότε η μετρούμενη τιμή του ρεύματος θα είναι μικρότερη από την πραγματική κατά 1 %. Αυτό το συστηματικό σφάλμα είναι μικρό και μπορεί να αγνοηθεί.

Όταν το πολύμετρο λειτουργεί ως μετρητής τάσης DC (συνεχές ρεύμα), η πιο ευαίσθητη κλίμακα του οργάνου είναι 200 mV και η διακριτική του ικανότητα είναι 0,01 mV. Έστω ότι κάποιο ρεύμα διαρρέει τη μετρητική αντίσταση και ο μετρητής δείχνει την ελάχιστη τιμή, δηλαδή 0,01 mV. Η τιμή του ρεύματος που δημιουργεί την τάση αυτή είναι

$$I = \frac{U}{R} = \frac{0,01 \text{ mV}}{1 \text{ M}\Omega} = \frac{10^{-5} \text{ V}}{10^6 \Omega} = 10^{-11} \text{ A} = 0,01 \text{ nA!}$$

Συνεπώς, αν το πολύμετρο δείξει π.χ. την τιμή 2,63 mV, αυτό απλώς θα σημαίνει ότι στο κύκλωμα του συμπαγούς δίσκου Δ₃ κυκλοφορεί ρεύμα 2,63 nA. Με άλλα λόγια, **τα ψηφία που εμφανίζονται στην οθόνη του πολυμέτρου αντιγράφονται σε μονάδες nA, χωρίς τη χρήση κάποιου πολλαπλασιαστικού παράγοντα.**

Π6.2.2. Ο ρόλος του πυκνωτή

Επειδή τα καλώδια του μετρητή είναι απροστάτευτα (δεν είναι θωρακισμένα), είναι ευάλωτα στην εναλλασσόμενη τάση των 50 Hz της ΔΕΗ. Για να μειωθεί η επαγόμενη τάση στα καλώδια, παράλληλα στη μετρητική αντίσταση των 1 MΩ συνδέεται ένας πυκνωτής, η χωρητικότητα του οποίου είναι 0,3 μF. Ο πυκνωτής δεν θα επηρεάσει το συνεχές ρεύμα, αλλά θα προστατέψει το πολύμετρο, μειώνοντας την επαγόμενη τάση από το δίκτυο της ΔΕΗ τόσες φορές, όσο η χωρητική αντίσταση του πυκνωτή, στα 50 Hz, είναι μικρότερη από 1 MΩ. Η χωρητική αντίσταση του πυκνωτή στα 50 Hz είναι $1/\omega C \approx 10 \text{ k}\Omega$. Επομένως, ο πυκνωτής μειώνει την επαγόμενη τάση της ΔΕΗ περίπου 100 φορές!

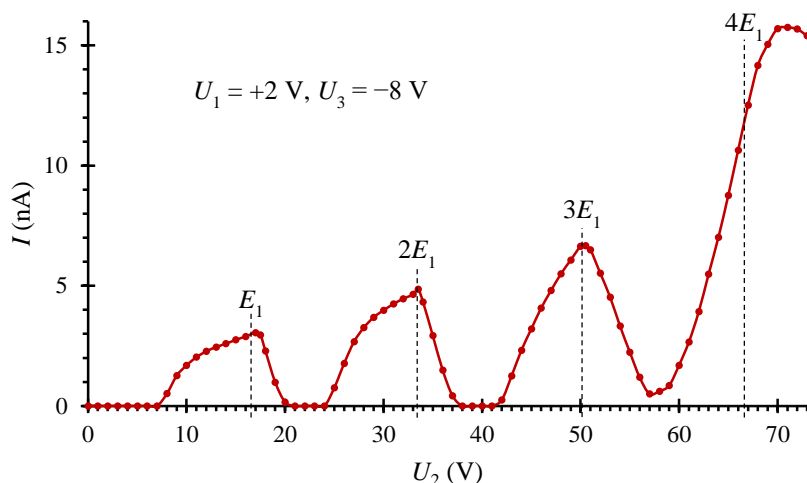
Τέλος, ο πυκνωτής και η μετρητική αντίσταση δημιουργούν ορισμένη αδράνεια στον μετρητή. Η αδράνεια αυτή είναι ίση με τη σταθερά χρόνου του μετρητικού κυκλώματος που αποτελείται από την αντίσταση 1 MΩ και τον πυκνωτή 0,3 μF:

$$\tau = RC = 10^6 \Omega \times 3 \times 10^{-7} \text{ F} = 0,3 \text{ s.}$$

Έτσι, στο πείραμα, όταν μεταβάλλεται η τάση U_2 , δεν θα πρέπει να καταγράφεται αμέσως η νέα τιμή του ρεύματος, αλλά αφού πρώτα περάσουν 1,5-2 δευτερόλεπτα ($\sim 5-6 \tau$).

Π6.3. Ερμηνεία της πειραματικής καμπύλης ρεύματος-τάσης

Η πειραματική καμπύλη ρεύματος-τάσης που καταγράφεται σε ένα πείραμα Franck-Hertz με λυχνία Ne (Σχ. Π6.4) ακολουθεί, σε γενικές γραμμές, την αναμενόμενη (βλ. Σχ. 6.6), παρατηρούνται όμως και οι εξής διαφορές: (α) η μετατόπιση ορισμένων κορυφών, (β) τα ύψη των κορυφών δεν είναι σταθερά και αυξάνονται με την U_2 , (γ) ο μη απότομος μηδενισμός του ρεύματος.



Σχήμα Π6.4. Πειραματική καμπύλη ρεύματος-τάσης της λυχνίας Ne. Οι διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν τα αναμενόμενα σημεία μηδενισμού του ρεύματος [Εξ. (6.4) και Σχ. 6.6].

Τις διαφορές αυτές προκαλούνται από παράγοντες που δεν λήφθηκαν υπόψη στην ανάλυση που προηγήθηκε και θα σχολιαστούν ακολούθως

Π6.3.1. Η μετατόπιση των κορυφών

Στο πείραμα, στον πρώτο διάτρητο δίσκο Δ_1 εφαρμόζεται θετική (ως προς την κάθοδο) τάση $U_1 = 2,00$ V. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής (1,82 V) εξουδετερώνει το δυναμικό επαφής μεταξύ καθόδου και δίσκου Δ_1 , ενώ το υπόλοιπο επιταχύνει τα ηλεκτρόνια και τα εισάγει στον κύριο χώρο της λυχνίας με ενέργειες 0,18 eV. Αυτό έχει ως συνέπεια τη μετατόπιση της καμπύλης κατά 0,18 V, ωστόσο μια τέτοια μετατόπιση δεν είναι πάντα εύκολο να παρατηρηθεί στην πειραματική καμπύλη.

Όμως, διακρίνεται σαφώς μια σημαντική διαφορά στη θέση της τελευταίας κορυφής σε σχέση με την αναμενόμενη, γεγονός που καθιστά επισφαλή τον προσδιορισμό της E_1 από αυτήν. Σε τέτοιες περιπτώσεις είναι προτιμότερο ο υπολογισμός της E_1 να γίνει από τις υπόλοιπες κορυφές, όπου οι συνθήκες που επικρατούν στη λυχνία διαφέρουν λιγότερο από αυτές που υποθέσαμε.

Π6.3.2. Ο ιονισμός των ατόμων Ne

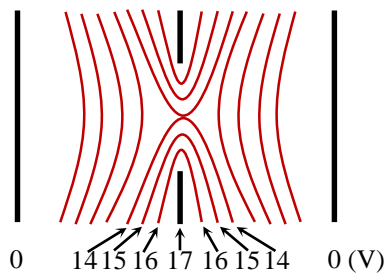
Η αύξηση του ύψους των κορυφών στην πειραματική καμπύλη οφείλεται στον ιονισμό των ατόμων Ne. Ο ιονισμός των ατόμων παρατηρείται όταν η ενέργεια του ελεύθερου ηλεκτρονίου είναι ίση ή μεγαλύτερη από 21,6 eV. Στην ανάλυση που προηγήθηκε υποθέσαμε ότι, στον κύριο χώρο, λόγω μεγάλης συγκέντρωσης των ατόμων Ne στη λυχνία, τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να αποκτήσουν ενέργεια μεγαλύτερη από 16,7 eV, ακόμα και όταν η τάση U_2 έχει πολύ μεγαλύτερη τιμή. Ο ισχυρισμός αυτός είναι σωστός, αλλά υπό τη στατιστική έννοια. Ένα ηλεκτρόνιο που έχει ενέργεια 16,7 eV μπορεί να συγκρουστεί με άτομο Ne, αλλά μπορεί και όχι, εάν δεν παραβρίσκεται άτομο στο σημείο όπου η ενέργειά του είναι 16,7 eV. Στο ηλεκτρόνιο αυτό δίνεται η δυνατότητα να αυξήσει την ενέργειά του και να διεγείρει μία από τις υψηλότερες στάθμες του ατόμου, ή ακόμη και να το ιονίσει. Συνεπώς, το γεγονός της σύγκρουσης έχει στατιστικό χαρακτήρα και εξαρτάται από τη συγκέντρωση των ατόμων Ne στη λυχνία. Άλλωστε, όταν οι επιστήμονες επιθυμούν να μελετήσουν όλο το φάσμα των διεγερμένων καταστάσεων, για να μειώσουν την πιθανότητα σύγκρουσης και να αυξήσουν τον

αριθμό των ηλεκτρονίων που συσσωρεύουν ενέργειες μεγαλύτερες της E_1 , μειώνουν τη συγκέντρωση των ατόμων στη λυχνία.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι, όταν η τάση U_2 γίνει μεγαλύτερη από 21,6 eV, ο ιονισμός των ατόμων Ne προκαλεί την εμφάνιση νέων, πρόσθετων φορέων ηλεκτρισμού στον κύριο χώρο της λυχνίας. Γενικά, η γένεση νέων φορέων εξαρτάται πολύ έντονα από την τάση, γεγονός που προκαλεί πρόσθετη και ραγδαία αύξηση του ρεύματος όταν η U_2 υπερβαίνει το δυναμικό ιονισμού.

Π6.3.3. Η ανομοιογένεια του ηλεκτρικού πεδίου στις οπές του διάτρητου δίσκου Δ_2

Ο μη απότομος μηδενισμός του ρεύματος εξελίσσεται σε διάστημα περίπου 4-5 V και προκαλείται από την ανομοιογένεια του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των οπών του διάτρητου δίσκου Δ_2 . Όταν στον δίσκο εφαρμόζεται τάση, π.χ. 17 V, αυτό δεν σημαίνει ότι όλα τα ηλεκτρόνια που καταφθάνουν στον δίσκο αποκτούν ενέργειες 17 eV, καθώς το δυναμικό αυτό υπάρχει μόνο πάνω στη μεταλλική επιφάνεια του δίσκου. Στις οπές, ιδίως στο κέντρο τους, το δυναμικό είναι κατά μερικά βολτ μικρότερο (βλ. Σχ. Π6.5). Έτσι, όταν τα ηλεκτρόνια διαπερνούν μια οπή, κινητική ενέργεια 17 eV θα αποκτήσουν εκείνα που διέρχονται πολύ κοντά στην περιφέρεια της οπής, ενώ αυτά που περνάνε ακριβώς από το κέντρο της θα αποκτήσουν 14 eV. Επομένως, μετά την οπή, δημιουργείται μια διασπορά στις ενέργειες των ηλεκτρονίων της τάξης μερικών eV.



Σχήμα Π6.5. Το δυναμικό στις οπές του διάτρητου δίσκου.

Η σχετική ανάλυση δείχνει ότι η μείωση του δυναμικού στο κέντρο της οπής εξαρτάται από τη διάμετρό της, καθώς επίσης και από την απόσταση μεταξύ των δίσκων. Οπότε, όταν το δυναμικό του δίσκου Δ_2 είναι π.χ. 17 V, μόνο μία πολύ λεπτή λωρίδα στην περιφέρεια της οπής έχει αυτό το δυναμικό, συνεπώς μονό ένα μικρό μέρος των ηλεκτρονίων αποκτά την ενέργεια E_1 , συγκρούεται ανελαστικά και αποκόπτεται από τη ροή των ηλεκτρονίων που καταφθάνει στον συμπαγή δίσκο Δ_3 . Τα υπόλοιπα ηλεκτρόνια διασχίζουν την επιφάνεια της οπής με ενέργειες μικρότερες από την E_1 , δεν συμμετέχουν στις ανελαστικές κρούσεις, επομένως δεν μηδενίζεται η κινητική τους ενέργεια και καταφθάνουν στον συμπαγή δίσκο Δ_3 . Καθώς η U_2 αυξάνεται, αυξάνεται και η επιφάνεια της οπής το δυναμικό της οποίας είναι μεγαλύτερο από E_1 , επομένως μεγαλύτερο μέρος των ηλεκτρονίων θα συγκρούεται ανελαστικά και θα αφαιρείται από τη ροή των ηλεκτρονίων που καταφθάνει στον συμπαγή δίσκο Δ_3 , έτσι το ρεύμα θα μειώνεται. Το ρεύμα θα μηδενιστεί μόνο όταν ακόμα και το κέντρο της οπής έχει δυναμικό 17 eV, αλλά αυτό θα συμβεί όταν η τάση στην επιφάνεια του δίσκου, δηλαδή η U_2 , γίνει υψηλότερη από την E_1 κατά 4-5 V, δηλαδή όσο είναι η διαφορά δυναμικού μεταξύ κέντρου και περιφέρειας της οπής.