

Άσκηση 6

Το πείραμα Frank - Hertz

6.1. Σκοπός

Στην άσκηση αυτή, μέσω του πειράματος Frank-Hertz θα πιστοποιηθεί η ύπαρξη διακριτών ενεργειακών σταθμών στο άτομο του Νέου. Θα παρατηρηθεί η διέγερση και η αποδιέγερση των ατόμων, όταν αυτά βομβαρδίζονται με ελεύθερα ηλεκτρόνια. Θα μετρηθεί η ενέργεια διέγερσης του Νέου στην πρώτη ενεργειακή στάθμη E_1 , όπως και το εξωτερικό δυναμικό επαφής μεταξύ δύο αγωγών. Επίσης, θα ελεγχθεί πειραματικά η υπόθεση περί μηδενισμού της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων στις μη ελαστικές κρούσεις.

6.2. Εισαγωγή

Στις αρχές του 20 αιώνα στα περίφημα πειράματα του Rutherford όπου μελετούσε τη σκέδαση των σωματιδίων α , οι επιστήμονες διαμόρφωσαν ένα μοντέλο του ατόμου, όμοιο με αυτό του ηλιακού συστήματος. Στο μοντέλο αυτό, στο κέντρο του ατόμου, σε χώρο που καταλαμβάνει μόνο το 10^{-4} της διαμέτρου του βρίσκεται ο θετικά φορτισμένος “βαρύς” πυρήνας, στον οποίο είναι συγκεντρωμένη σχεδόν όλη η μάζα του ατόμου. Γύρω από τον πυρήνα περιστρέφονται τα αρνητικά φορτισμένα “ελαφριά” ηλεκτρόνια.

Στα πλεονεκτήματα του “πλανητικού” μοντέλου πρέπει να αναφέρουμε την απλότητά του, όπως επίσης και το γεγονός ότι το ηλιακό σύστημα είναι υπαρκτό και ευσταθές. Οι πλανήτες δεν πέφτουν στον ήλιο εδώ και πολλά δεκατομμύρια χρόνια. Ωστόσο το “πλανητικό” μοντέλο ερχόταν σε άμεση σύγκρουση με τις ιδιότητες των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Διαπιστώθηκε, για παράδειγμα, ότι όταν τα ηλεκτρόνια είναι ελεύθερα, δηλαδή είναι έξω από τα άτομα, εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια όταν η κίνησή τους είναι επιβραδυνόμενη. Στην ιδιότητα αυτή στηρίζεται η παραγωγή ακτινών X στα ακτινογραφικά κέντρα. Επίσης τα ηλεκτρόνια ακτινοβολούν και όταν αυτά κινούνται σε μακροσκοπικές κλειστές τροχιές με σταθερή γωνιακή ταχύτητα ω . Διαπιστώθηκε ακόμη ότι η συχνότητα της ακτινοβολίας είναι ίση με τη συχνότητα περιστροφής.

Οι προαναφερθείσες ιδιότητες των ελεύθερων ηλεκτρονίων έκαναν το πλανητικό μοντέλο ασταθές. Έτσι σύμφωνα με τις ιδιότητες των ελευθέρων ηλεκτρονίων, το ηλεκτρόνιο του ατόμου, κινούμενο σε κλειστή τροχιά πρέπει συνεχώς να χάνει την ενέργειά του, οπότε κάποια στιγμή θα πέσει στον πυρήνα. Παρότι τα πειράματα του Rutherford υποστήριζαν άμεσα το πλανητικό μοντέλο, την εποχή εκείνη το μοντέλο αυτό βρισκόταν σε σύγκρουση με τα πειραματικά αποτελέσματα άλλων πειραμάτων. Το αδιέξοδο ξεπεράστηκε στις περίφημες προτάσεις του Niels Bohr, που έγιναν το 1913.

6.2.1. Το πείραμα Frank - Hertz

Οι προτάσεις Bohr αποτέλεσαν το θεμέλιο πάνω στο οποίο αργότερα οικοδομήθηκε η σύγχρονη Κβαντική Μηχανική και διαμόρφωσαν τις σύγχρονες αντιλήψεις για το άτομο, αλλά την εποχή που αυτές διατυπώθηκαν, έμμεσα στηριζόταν μόνο από τη σταθερά Rydberg που προέκυπτε από το προτεινόμενο μοντέλο, όταν εφαρμοζόταν στο άτομο του υδρογόνου. Η σύμπτωση της θεωρητικής με την πειραματική τιμή της σταθεράς ήταν θαυμαστική.

Η πρώτη άμεση πειραματική επιβεβαίωση των προτάσεων Bohr έγινε ένα χρόνο μετά από τους Frank και Hertz το 1914, στα περίφημα ομώνυμα πειράματα και τιμήθηκαν για το έργο τους με το βραβείο Nobel το 1925.

Οι ερευνητές μελετούσαν την κίνηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε μία ηλεκτρονική δίοδο, με την παρουσία ατμών υδραργύρου (1 Torr) και έδειξαν ότι:

1. Όταν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα άτομα του υδραργύρου 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 ξεετάζει κανείς τη σύγκρουση δύο σωματιδίων. Πράγματι, σύμφωνα με τις αρχές διατήρησης της ορμής και ενέργειας, η απώλεια της κινητικής ενέργειας ΔE_k του “μικρού” σωματιδίου 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 ενέργειά του, ενώ M είναι η μάζα του ακίνητου “μεγάλου”. Σε περίπτωση σύγκρουσης του ηλεκτρονίου με το άτομο του υδραργύρου, η αναμενόμενη απώλεια ενέργειας από το ηλεκτρόνιο είναι μικρότερη από 0,01%.

2. Έδειξαν ακόμη ότι η σχέση (6.1) ισχύει μόνο όταν οι ενέργειες των ελεύθερων ηλεκτρονίων διαφέρουν από 4,90 eV. Ωστόσο, όταν το ελεύθερο ηλεκτρόνιο έχει κινητική ενέργεια 4,90 eV ακριβώς (σωστότερα, με μια διασπορά της τάξης 10 ~ 20 meV) τη στιγμή της σύγκρουσης, στην αλληλεπίδραση του ηλεκτρονίου με το άτομο κάτι συμβαίνει και το ηλεκτρόνιο χάνει όλη την κινητική του ενέργεια (απώλεια 100%), παραμένοντας ελεύθερο, δηλαδή χωρίς να κολλήσει στο άτομο.

3. Ανέφεραν ακόμη μια αξιοσημείωτη παρατήρηση: στο χώρο όπου γίνονται οι μη ελαστικές κρούσεις, τα άτομα του υδραργύρου εκπέμπουν υπεριώδη ακτινοβολία, το μήκος κύματος της οποίας είναι 2537 Å. Σύμφωνα με τη σχέση Planck – Einstein, η ενέργεια αυτών των φωτονίων είναι 4,90 eV!

Οι δύο επιστήμονες έδωσαν την εξής ερμηνεία των πειραματικών τους δεδομένων.

Στις μη ελαστικές κρούσεις στο άτομο του υδραργύρου, εκτός από τη θεμελιώδη κατάσταση με ενέργεια E_0 , στην οποία μπορεί να βρίσκεται επ’ άπειρον, υπάρχουν και διεγερμένες καταστάσεις οι οποίες 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 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. Εδώ ισχύουν οι νόμοι της κλασικής φυσικής που περιγράφουν τη σύγκρουση δύο μαζών. Όταν όμως οι ενέργειές τους είναι 4,90 eV ακριβώς, τα άτομα απορροφούν (δέχονται) όλη την κινητική ενέργεια αυτών των ηλεκτρονίων και διεγείρονται, ενώ η κινητική ενεργεία των ηλεκτρονίων μηδενίζεται.

Στην εκπομπή της υπεριώδους ακτινοβολίας όταν οι συγκρούσεις είναι μη ελαστικές, τα άτομα του υδραργύρου διεγείρονται σε μια νέα κατάσταση, η ενέργεια της οποίας είναι υψηλότερη από τη θεμελιώδη κατά 4,90 eV. Η κατάσταση αυτή δεν διαρκεί πολύ, καθώς τα άτομα επιστρέφουν στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας από ένα φωτόνιο, η ενέργεια του οποίου είναι 4,90 eV.

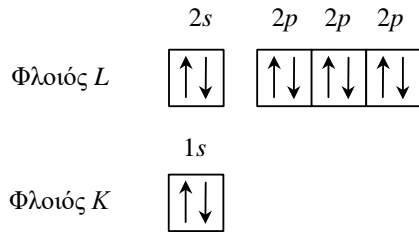
6.3. Άτομο του Νέου

6.3.1. Ενεργειακό διάγραμμα του Νέου

Για να γίνει πιο κατανοητή η διαδικασία διέγερσης των ατόμων Νέου, είναι σκόπιμο να παρουσιάσουμε το ενεργειακό του διάγραμμα. Το άτομο του Νέου έχει $Z = 10$, 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.

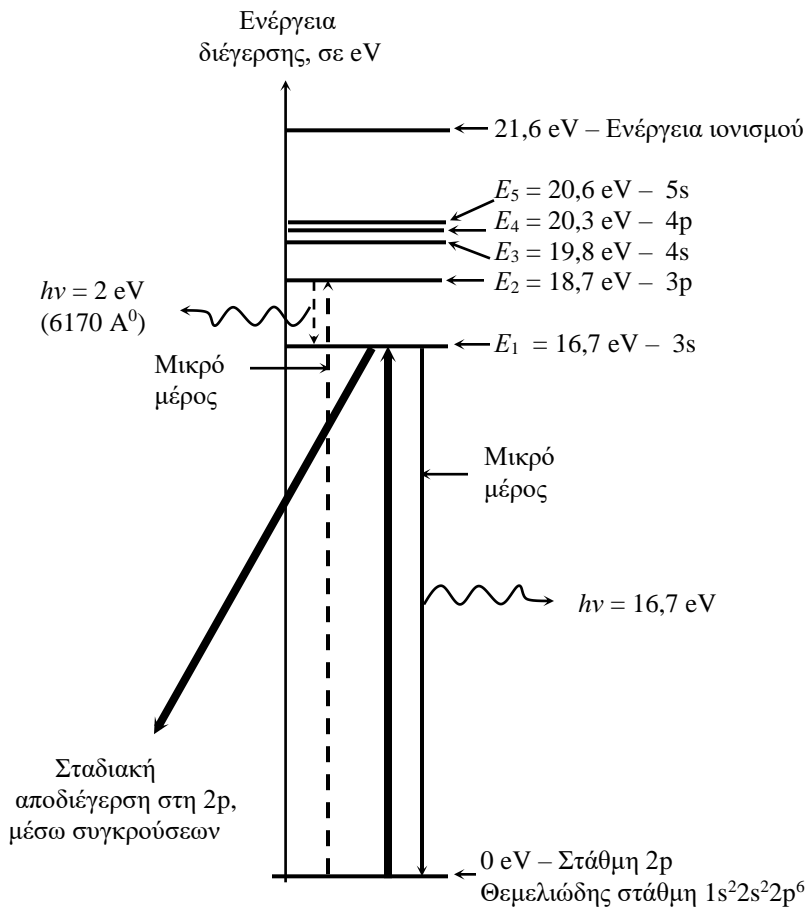
Έτσι η δομή της θεμελιώδους κατάστασης είναι $1s^2 2s^2 2p^6$, όπου οι άνω δείκτες συμβολίζουν τον αριθμό των ηλεκτρονίων που βρίσκονται σε κατάσταση s ή p , οι αριθμοί 1,2 κ.λ.π. συμβολίζουν τον κύριο κβαντικό αριθμό n , ενώ ο κβαντικός αριθμός της τροχιακής στροφορμής l συμβολίζεται με τα γράμματα s, p, d, f , κ.λ.π. ($s: l = 0, p: l = 1, d: l = 2, f: l = 3$). Τα βελάκια συμβολίζουν τα σπιν των ηλεκτρονίων. Η μεταπήδηση ενός από τα 6 ηλεκτρόνια που βρίσκονται στον υποφλοιό $2p$, στη στάθμη $3s$, αντιστοιχεί στην πρώτη διεγερμένη στάθμη, ενώ η μεταπήδηση στη στάθμη $3p$, αντιστοιχεί στη δεύτερη διεγερμένη κ.ο.κ. (Σχ. 6.2).



Σχήμα 6.1. Κατάσταση των ηλεκτρονίων στο άτομο του Νέου

Στη λυχνία της Άσκησης, η συντριπτική πλειοψηφία των ατόμων Νέου διεγείρεται στη στάθμη $3s$, που έχει τη μικρότερη ενέργεια διεγερσης, $16,7 \text{ eV}$. Επομένως, αυτή η τιμή θα εκδηλώνεται στις ηλεκτρικές μετρήσεις.

Ένα μέρος των διεγερμένων ατόμων αποδιεγείρεται εκπέμποντας φωτόνια με ενέργειες $16,7 \text{ eV}$. Το φάσμα αυτών των φωτονίων βρίσκεται στην περιοχή της



Σχήμα 6.2

υπεριώδους ακτινοβολίας, η οποία δεν είναι ορατή. Λόγω μεγάλης συγκέντρωσης των ατόμων Νέου στη λυχνία (10 mbar ή 7,5 Torr), το μεγαλύτερο μέρος των διεγερμένων ατόμων αποδιεγείρεται από τη στάθμη αυτή μέσω συγκρούσεών τους 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 δε συνοδεύεται με εκπομπή φωτός.

Εντωμεταξύ, παρατηρείται πειραματικά, ότι η περιοχή στην οποία τα άτομα του Νέου αποδιεγείρονται εκπέμπει ορατό φως, ενώ θεωρητικά, δε θα έπρεπε καθώς τα φωτόνια με ενέργειες 16,7 eV δεν είναι ορατά. Η παρουσία της ορατής ακτινοβολίας ερμηνεύεται ως εξής.

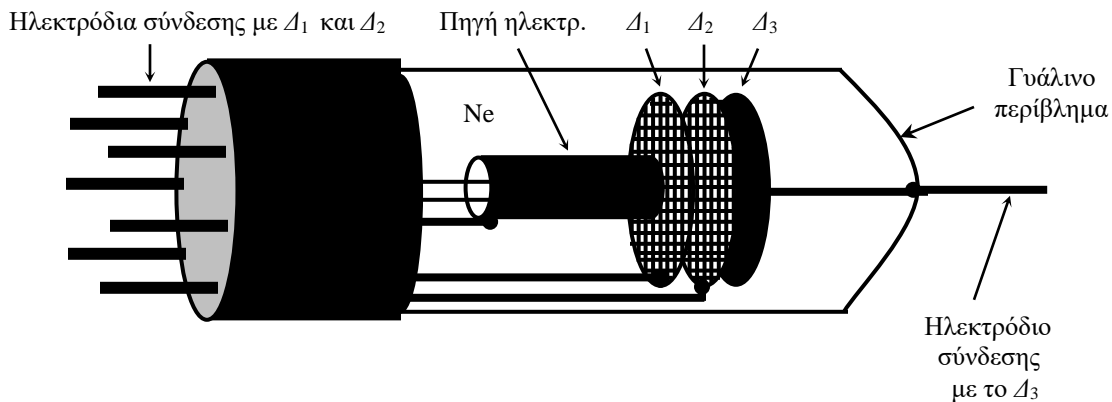
Καθώς η σύγκρουση του ηλεκτρονίου με το άτομο είναι τυχαίο γεγονός, ένα μικρό μέρος των ηλεκτρονίων “παρακάμπτει” την ενεργειακή στάθμη E_1 και διεγείρει τη στάθμη E_2 (3p), η ενέργεια διέγερσης της οποίας είναι 18,7 eV. Πώς στη λυχνία γίνεται αυτό θα δούμε πιο κάτω.

Η αποδιέγερση της στάθμης E_2 γίνεται όπως και της E_1 . Αλλά ένα μέρος αυτών των διεγερμένων ατόμων ακολουθεί άλλη ενεργειακή διαδρομή, δηλαδή τη διαδρομή $3p \rightarrow 3s \rightarrow 2p$ (διακεκομμένα βέλη στο Σχ. 6.2). Η διαδρομή $3p \rightarrow 3s$ συνοδεύεται με εκπομπή φωτονίων, με ενέργειες $(18,7 - 16,7) \text{ eV} = 2 \text{ eV}$. Το μήκος κύματος αυτών των φωτονίων είναι 6170 Å που ανήκει στην περιοχή του ορατού φάσματος του ανοιχτού ερυθρού. Έτσι, η περιοχή όπου γίνονται οι διεγέρσεις και οι αποδιεγέρσεις της δεύτερης στάθμης των ατόμων Νέου μπορεί να παρατηρηθεί με γυμνό οφθαλμό, αρκεί στο εργαστήριο να υπάρχει μερική συσκότιση.

6.4. Λυχνία Νέου

Στην Άσκηση, το πείραμα διεξάγεται σε άτομα του αερίου Νέου και όχι στους ατμούς του υδραργύρου, όπως στα πειράματα των Frank-Hertz. Παρά τη μεγάλη ιστορική σημασία των πειραμάτων αυτών, η λυχνία υδραργύρου έχει τα εξής μειονεκτήματα:

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

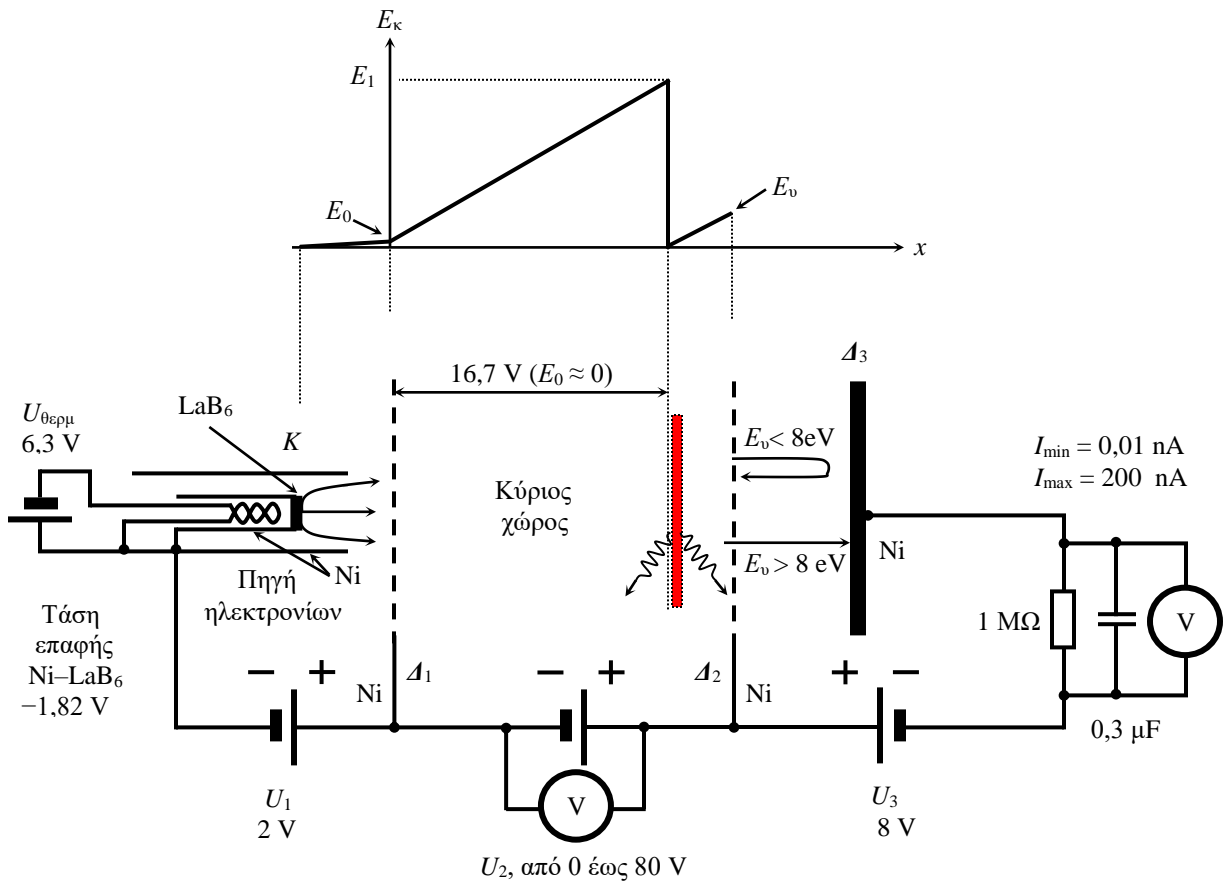


Σχήμα 6.3. Λυχνία Νέου

Η λυχνία Νέου (Σχ. 6.3) 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 είναι πολύ μεγαλύτερη και συνεπώς ευκολότερα μετρήσιμη με ικανοποιητική ακρίβεια. Στην Άσκηση θα μελετηθεί η διέγερση και η αποδιέγερση των ατόμων του Νέου που περιέχεται σε μία ηλεκτρονική λυχνία υπό πίεση 10 mbar (7,5 Torr).

6.5. Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα κιβώτιο – βάση, στο οποίο εισάγεται και στηρίζεται η λυχνία Νέου. Στο εσωτερικό του κιβωτίου είναι ενσωματωμένες 4 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), για τη μέτρηση των μικρών ρευμάτων ηλεκτρονίων που καταλήγουν στο δίσκο Δ₃.



Σχήμα 6.4. Λυχνία Νέου και η τροφοδοσίας της με διάφορες τάσεις.

Στο Σχ.6.4 φαίνονται, σε τομή, τα βασικότερα μέρη της λυχνίας και ο τρόπος τροφοδοσίας της με διάφορες τάσεις.

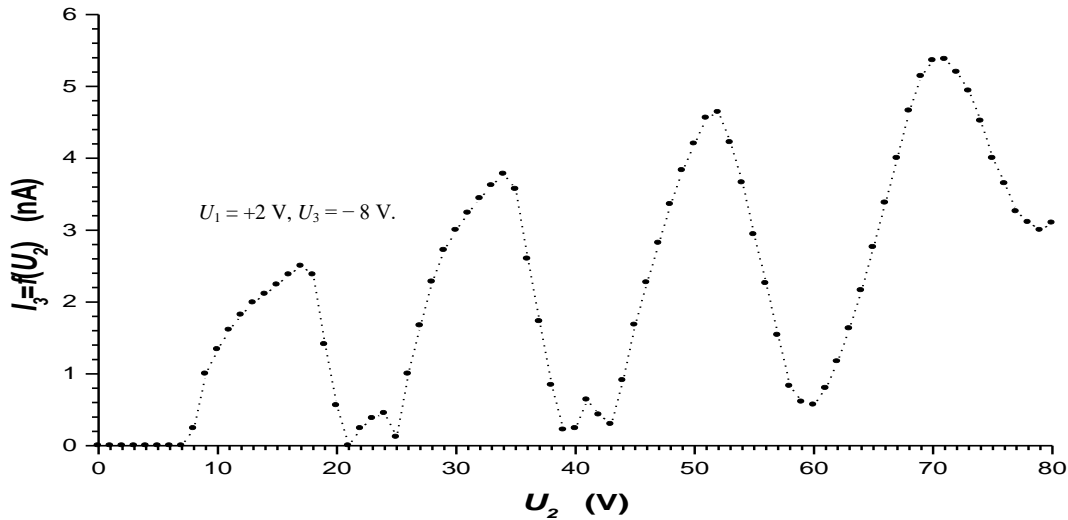
Η λυχνία περιέχει μία θερμαινόμενη κάθοδο K (LaB₆, πηγή ηλεκτρονίων), δύο διάτρητους δίσκους Δ₁ και Δ₂, από νικέλιο, όπως επίσης και ένα συμπαγή δίσκο Δ₃, επίσης από νικέλιο.

Ο χώρος της λυχνίας χωρίζεται σε τρία βασικά μέρη:

- α) Αριστερά του δίσκου Δ_1 βρίσκεται ο χώρος παραγωγής ελεύθερων ηλεκτρονίων (κάθοδος).
 β) Ο χώρος μεταξύ Δ_1 και Δ_2 αποκαλείται κύριος χώρος της λυχνίας, όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επιταχύνονται, αυξάνουν την κινητική τους ενέργεια και συγκρούονται ελαστικά ή μη ελαστικά με τα άτομα του Νέου. Στον κύριο χώρο παρατηρείται και εκπομπή ορατού φωτός, όταν τα ηλεκτρόνια διεγείρουν τη δεύτερη ενεργειακή στάθμη των ατόμων.
 γ) Στο χώρο μεταξύ Δ_2 και Δ_3 δημιουργείται επιβραδυντικό πεδίο (-8 V), με το οποίο αποκόπτονται τα ηλεκτρόνια που εισέρχονται στο χώρο αυτό με ενέργειες μικρότερες από 8 eV .

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

Μία τυπική καμπύλη αυτού του είδους δίνεται στο Σχ. 6.5, όπου η τάση U_2 μεταβαλλόταν από 0 έως 80 V .



Σχήμα 6.5

Για να ερμηνεύσουμε την παραπάνω πειραματική καμπύλη, που δεν είναι εύκολο, πρέπει να εξετάσουμε προσεκτικά τους 3 χώρους της λυχνίας και στη συνέχεια να δούμε πώς εμπλέκονται στην καμπύλη αυτή οι παράμετροι E_1 , U_1 , και U_3 . Για το σκοπό αυτό είναι χρήσιμο να εξετάσουμε πρώτα μερικές χαρακτηριστικές καταστάσεις που δημιουργούνται στον κύριο χώρο όταν η τάση U_2 έχει ορισμένες συγκεκριμένες τιμές, για παράδειγμα 15 , 25 ή 40 V . Η ανάλυση αυτή θα μας επιτρέψει να δημιουργήσουμε ένα μοντέλο κύριων φυσικών φαινομένων που διαδραματίζονται μέσα στη λυχνία. Στη συνέχεια, από το μοντέλο αυτό θα κατασκευάσουμε την αναμενόμενη καμπύλη “ρεύμα-τάση”, την οποία θα τη συγκρίνουμε τελικά με την πειραματική. Μεταξύ άλλων, η σύγκριση αυτή θα μας επιτρέψει να κρίνουμε το βαθμό προσέγγισης του μοντέλου, όπως επίσης και καλύτερα να επιλέξουμε το μέρος της πειραματικής καμπύλης από το οποίο θα μετρηθεί η ενέργεια διέγερσης E_1 .

6.5.1 Πηγή ελεύθερων ηλεκτρονίων, κάθοδος

Στη λυχνία, η παροχή ελεύθερων ηλεκτρονίων γίνεται από μία σύνθετη κατασκευή. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκπέμπονται από μία 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 θερμιονική εκπομπή ηλεκτρονίων.

Το στρώμα του LaB_6 βρίσκεται στη βάση ενός λεπτού ($d = 1,5 \text{ mm}$) μεταλλικού (Ni) κοίλου κυλίνδρου, εντός του οποίου υπάρχει ένα θερμαντικό στοιχείο υπό μορφή σπирάλ. Μία συνεχής τάση των $6,3 \text{ V}$ θερμαίνει το σπирάλ και, ακολούθως, το LaB_6 . 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 $1,5 \text{ mm}$ (Σχ. 6.4), για να απλωθεί η δέσμη των ηλεκτρονίων, η κάθοδος είναι τοποθετημένη στο κέντρο ενός άλλου μεταλλικού κοίλου κυλίνδρου, από Νικέλιο και αυτός, η διάμετρος του οποίου είναι 10 mm . Η κάθοδος είναι βυθισμένη κατά 2 mm , ως προς τον εξωτερικό κύλινδρο που την περιβάλλει. Έτσι, όταν στο δίσκο Δ_1 εφαρμόζεται μία μικρή θετική τάση U_1 ($2-3 \text{ V}$), τα ηλεκτρόνια, κινούμενα προς το δίσκο Δ_1 απλώνονται όπως στο σχήμα.

Αλλά η κύρια αποστολή της πηγής U_1 είναι να εξουδετερώνει το αρνητικό δυναμικό επαφής που δημιουργείται μεταξύ LaB_6 και Ni , που είναι περίπου $1,8 \text{ V}$ (βλ. Παράρτημα 3). Από την άλλη πλευρά, η τιμή της U_1 δεν πρέπει να είναι πολύ μεγαλύτερη του δυναμικού επαφής, προκειμένου στον κύριο χώρο να εισάγονται ηλεκτρόνια με περίπου μηδενικές αρχικές ενέργειες ($E_0 \approx 0$).

Έτσι, καθώς τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της καθόδου έλκονται από το θετικά πολωμένο διάτρητο δίσκο Δ_1 , ένα μέρος τους (25%), μέσα από τις σπές, διαπερνά το Δ_1 και εισέρχονται στον κύριο χώρο με σχεδόν μηδενικές ενέργειες. Οι αρχικές ενέργειες E_0 είναι $0,1 - 0,3 \text{ eV}$, όταν η τάση U_1 είναι κατά $0,1 - 0,3 \text{ V}$ υψηλότερη από το αρνητικό δυναμικό επαφής. Προφανώς, με τόσο μικρές θετικές τάσεις, το ρεύμα ηλεκτρονίων που εισάγεται στον κύριο χώρο της λυχνίας θα είναι πολύ μικρό (μερικά νανοαμπέρ). Επομένως ο μετρητής ρεύματος της διάταξης πρέπει να είναι πολύ ευαίσθητη συσκευή!

6.5.2 Κατανομή του ηλεκτρικού δυναμικού στον κύριο χώρο της λυχνίας

Με την πηγή τάσης U_2 , στον κύριο χώρο δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των διάτρητων δίσκων Δ_1 και Δ_2 . Είναι σκόπιμο να εξετάσουμε πρώτα το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται μεταξύ των δύο δίσκων. Σημειώνουμε ότι η διάμετρος των διάτρητων δίσκων είναι 30 mm , ενώ η απόσταση μεταξύ τους 5 mm , δηλαδή ο λόγος διάμετρος προς απόσταση είναι 6. Αυτό μας επιτρέπει να πούμε ότι στην κεντρική περιοχή του κύριου χώρου το ηλεκτρικό πεδίο είναι ομογενές. Συνεπώς το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνει γραμμικά. Στην περιοχή αυτή τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και, συναρτήσει θέσης, αυξάνουν την κινητική τους ενέργεια επίσης *γραμμικά*, όπως αυτό φαίνεται στο πάνω μέρος του Σχ. 6.4.

Πράγματι, αγνοώντας τη μικρή παραμόρφωση του πεδίου που δημιουργεί η παρουσία των ελεύθερων ηλεκτρονίων, σε έναν επίπεδο πυκνωτή το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου είναι γραμμική συνάρτηση θέσης. Έτσι, αν επιλέξουμε τον άξονα OX να περνά κάθετα από τα κέντρα των δύο δίσκων, τα μηδενικά, πάνω στο δίσκο Δ_1 , τότε στη θέση x , το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου είναι

$$U(x) = \frac{U_2}{d} x \quad (6.1)$$

όπου U_2 είναι η τάση στο δίσκο Δ_2 και d είναι η απόσταση μεταξύ των δίσκων του ιδίομορφου αυτού επίπεδου πυκνωτή. Συνεπώς, στη θέση x , η κινητική ενέργεια του ελεύθερου ηλεκτρονίου είναι ίση με τη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας στο σημείο αυτό, συν η αρχική κινητική ενέργεια E_0 , με την οποία αυτό εισέρχεται στον κύριο χώρο. Επομένως στη θέση x , η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων είναι

$$E_x = E_0 + \frac{U_2}{d} x \quad \text{ή} \quad E_x = \frac{U_2}{d} x, \quad \text{όταν } E_0 \approx 0. \quad (6.2\alpha\beta)$$

Σημειώνουμε ότι η εικόνα αυτή είναι σωστή όταν τα ηλεκτρόνια κινούνται στο κενό. Παρουσία αερίου, η εικόνα είναι προσεγγιστική, καθώς δεν περιλαμβάνει τις μυριάδες ελαστικές κρούσεις των ηλεκτρονίων με τα άτομα, που χασοκοποούν την κατανομή των ορμών στο χώρο. Παρά ταύτα, αν εξετάσει κανείς το θέμα αυτό πιο προσεκτικά, θα διαπιστώσει ότι παρά τις ελαστικές κρούσεις με τα άτομα, τα ηλεκτρόνια μετακινούνται συστηματικά προς το δίσκο Δ_2 , ενώ στη θέση x , οι ενέργειες των ηλεκτρονίων ορίζονται από τη σχέση 6.2β.

6.5.3 Χώρος ανάλυσης των ενεργειών των ηλεκτρονίων

Στον κύριο χώρο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και κινούνται προς το διάτρητο δίσκο A_2 , η διαπερατότητα του οποίου είναι επίσης 25%. Το 75% των ηλεκτρονίων καταλήγει στην επιφάνεια του A_2 , αλλά το υπόλοιπο 25 %, μέσα από τις οπές, διαπερνά το δίσκο και συνεχίζουν την κίνησή τους προς το συμπαγή δίσκο A_3 .

Σκόπιμα, στο χώρο μεταξύ A_2 και A_3 δημιουργείται ένα επιβραδυντικό ηλεκτρικό πεδίο, όπου οι κινητικές ενέργειες των ηλεκτρονίων μπορούν να μετρηθούν. Η πιο διαδεδομένη μέθοδος που χρησιμοποιείται από τους ερευνητές για το σκοπό αυτό είναι η *μέθοδος επιβραδυντικού πεδίου*.

Το επιβραδυντικό πεδίο δημιουργείται από μία αυτόνομη και ρυθμιζόμενη πηγή τάσης U_3 , ο αρνητικός πόλος της οποίας, μέσω ενός μετρητού ρεύματος συνδέεται με το δίσκο A_3 , ενώ ο θετικός πόλος συνδέεται με το δίσκο A_2 . Σε σύντομη διατύπωση λέμε ότι στο δίσκο A_3 εφαρμόζεται αρνητική τάση U_3 .

6.6. Μερικές χαρακτηριστικές καταστάσεις

Στα περίφημα ομώνυμα περάματα των Frank–Hertz, η αρνητική τάση που εφαρμοζόταν στη δεύτερη άνοδο ήταν μόνιμα ρυθμισμένη στα $-0,5$ V. Στα πειράματα με το αέριο Νέου 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, προορισμός της οποίας είναι να εξουδετερώσει το επιβραδυντικό δυναμικό επαφής και να εισάγει ελεύθερα ηλεκτρόνια στον κύριο χώρο με μικρές αρχικές ενέργειες. Η μόνη τάση που μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του πειράματος είναι η τάση U_2 , που μεταβάλλεται από 0 έως 80 V.

Στο Σχ. 6.5 παρουσιάζονται 3 περιπτώσεις εξέλιξης της κινητικής ενέργειας των ελεύθερων ηλεκτρονίων, κατά μήκος της λυχνίας, για 3 διαφορετικές τάσεις της πηγής U_2 . Στην ανάλυση που ακολουθεί θα αγνοήσουμε τη μικρή άλλωστε κινητική ενέργεια E_0 , με την οποία τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εισέρχονται στον κύριο χώρο.

Όπως οι Frank και Hertz, θα υποθέσουμε ακόμη ότι στις μη ελαστικές κρούσεις οι ενέργειες των ελεύθερων ηλεκτρονίων *μηδενίζονται*. Στηριζόμενοι στην υπόθεση αυτή, θα οικοδομήσουμε μία *ιδανική σειρά φυσικών φαινομένων* (μοντέλο) που θα μας επιτρέψει να προβλέψουμε πώς και πότε τα ηλεκτρόνια καταφθάνουν ή δεν καταφθάνουν στο συμπαγή δίσκο A_3 , όπου το ρεύμα ηλεκτρονίων μπορεί να μετρηθεί. Έτσι, μετρώντας το ρεύμα αυτό, το πείραμα θα δείξει σε ποιο βαθμό το μοντέλο μας είναι σωστό.

Ουσιαστικά, αυτό που πρέπει να εξετάσουμε είναι πώς η τάση U_2 επηρεάζει το ρεύμα ηλεκτρονίων που καταφθάνει στο συμπαγή δίσκο A_3 , λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το ρεύμα έχει μη μηδενική τιμή όταν τα ηλεκτρόνια κινούνται (κάθεται) προς το συμπαγή δίσκο A_3 με ενέργειες άνω των 8 eV. Η ίδια η τιμή του ρεύματος δεν έχει σημασία, αρκεί ο μετρητής να είναι σε θέση να τη μετρήσει. Προφανώς, ο μετρητής ρεύματος θα δείχνει μηδική τιμή όταν τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στο χώρο του επιβραδυντικού πεδίου με ενέργειες μικρότερες από 8 eV.

Κατάσταση (α), $U_2 = 15$ V.

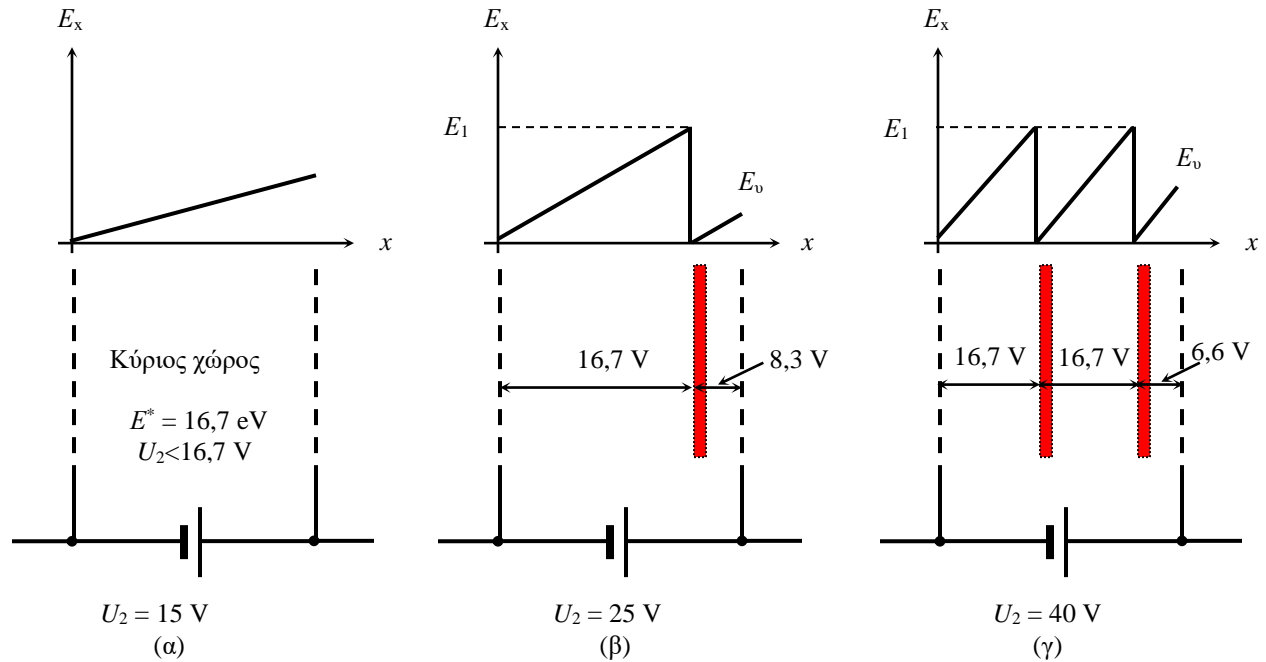
Έστω ότι μεταξύ των δίσκων A_1 και A_2 δημιουργείται διαφορά δυναμικού 15 V, δηλαδή $U_2 = 15$ V.

Στην περίπτωση αυτή στον κύριο χώρο της λυχνίας τα ελεύθερα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και αυξάνουν την κινητική τους ενέργεια γραμμικά, έως την τιμή 15 eV. Επειδή οι ενέργειές τους δεν ξεπερνούν τα 15 eV, δηλαδή είναι μικρότερες ακόμη και από την πρώτη στάθμη διέγερσης E_1 (16,7 eV), οι συγκρούσεις των ηλεκτρονίων με τα άτομα του Νέου είναι ελαστικές παντού.

Όταν τα ηλεκτρόνια πλησιάζουν το δίσκο A_2 , το 75 % συγκρούεται με την επιφάνεια του διάτρητου δίσκου A_2 και οδηγούνται στο θετικό πόλο της πηγής U_2 , ενώ το υπόλοιπο 25 %, μέσα από τις οπές, εισέρχεται στο χώρο του επιβραδυντικού πεδίου με ενέργειες 15 eV. Αν στο A_3 το επιβραδυντικό δυναμικό είναι -8 V, τότε τα ηλεκτρόνια θα συγκρουστούν με το συμπαγή δίσκο A_3 με ενέργειες 7 eV (15-8) και θα καταμετρηθούν τελικά από το μετρητή ρεύματος. Συμπεραίνουμε ότι όταν $8 \text{ V} < U_2 < E_1$,

όλα τα ηλεκτρόνια θα καταφθάνουν στο συμπαγή δίσκο και ο μετρητής ρεύματος θα δείχνει μη μηδενική τιμή.

Προφανώς, όταν η τάση U_2 είναι μικρότερη από 8 V, κανένα ηλεκτρόνιο δε θα είναι σε θέση να διαπεράσει το απωστικό δυναμικό και ο μετρητής θα δείχνει μηδενική τιμή.



Σχήμα 6.6. Τρεις περιπτώσεις εξέλιξης της κινητικής ενέργειας στον κύριο χώρο

Κατάσταση (β), $U_2 = 25 \text{ V}$

Έστω ότι η τάση U_2 είναι 25 V, δηλαδή $U_2 > E_1$.

Σε κάποια απόσταση από το Δ_1 το δυναμικό είναι 16,7 V, επομένως στο σημείο αυτό οι ενέργειες των ηλεκτρονίων είναι 16,7 eV και τα ηλεκτρόνια συγκρούονται *μη ελαστικά* με τα άτομα του Νέου. Στην περιοχή αυτή οι ενέργειες των περισσότερων ηλεκτρονίων μηδενίζονται και τα άτομα εκπέμπουν υπεριώδη ακτινοβολία που δεν είναι ορατή.

Τα ηλεκτρόνια που υπέστησαν μη ελαστική κρούση θα επιταχυνθούν εκ νέου και λίγο πριν τη σύγκρουση με το δίσκο Δ_2 θα αποκτήσουν κινητική ενέργεια E_0 , η οποία είναι όσο και η διαφορά δυναμικού στο δεύτερο κύκλο επιτάχυνσης, δηλαδή $25 \text{ V} - 16,7 \text{ V} = 8,3 \text{ V}$. Αλλά καθώς τα ηλεκτρόνια με κινητικές ενέργειες $E_0 = 8,3 \text{ eV}$ μπορούν να διαπεράσουν την επιβραδυντική τάση των -8 V , θα συγκρουστούν με το συμπαγή δίσκο με ενέργειες 0,3 eV και τελικά θα καταμετρηθούν από το νανοαμπερόμετρο.

Αλλά καθώς η σύγκρουση του ηλεκτρονίου με το άτομο είναι τυχαίο γεγονός, ένα μικρό μέρος των ηλεκτρονίων (που έχουν ενέργειες 16,7 eV) *κατορθώνουν να αποφύγουν* τη σύγκρουση και να φτάσουν στο σημείο όπου το δυναμικό είναι 18,7 V, δηλαδή αποκτούν ενέργειες 18,7 eV (η περιοχή αυτή βρίσκεται δεξιότερα κατά 2 V). Αν τώρα στην περιοχή 18,7 V τα ηλεκτρόνια συγκρουστούν με κάποια άτομα του Νέου, αυτά θα διεγείρουν τη στάθμη 3p, η σταδιακή αποδιέγερση της οποίας συνοδεύεται με εκπομπή ορατού φωτός. Συμπεραίνουμε ότι ο χώρος όπου γίνονται οι μη ελαστικές κρούσεις δε συμπίπτει με την περιοχή όπου παρατηρείται εκπομπή αμυδρού ορατού φωτός.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι όταν η τάση U_2 είναι 25 V, αναμένουμε στον κύριο χώρο να παρατηρείται μία λεπτή περιοχή που εκπέμπει φως και, επίσης, το νανοαμπερόμετρο θα δείχνει μη μηδενική τιμή.

Κατάσταση (γ), $U_2 = 40 \text{ V}$

Έστω ότι η τάση U_2 είναι 40 V . Όταν η τάση U_2 είναι λίγο μεγαλύτερη από $2E_1$, στον κύριο χώρο υπάρχουν δύο περιοχές όπου οι συγκρούσεις είναι μη ελαστικές. Η πρώτη περιοχή βρίσκεται στο σημείο όπου το δυναμικό του ηλεκτρικού πεδίου είναι $16,7 \text{ V}$. Αλλά καθώς τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται δεύτερη φορά, αυτά αποκτούν πάλι κινητικές ενέργειες $16,7 \text{ eV}$ στο σημείο όπου η το δυναμικό είναι $2E_1$ ή $33,4 \text{ V}$.

Τα ηλεκτρόνια θα εισέρχονται στο επιβραδυντικό πεδίο με κινητικές ενέργειες E_0 που αυτά αποκτούν στο διάστημα της τρίτης επιτάχυνσης. Στην τελευταία (τρίτη) επιτάχυνση τα ηλεκτρόνια θα διατρέξουν μία διαδρομή, με διαφορά δυναμικού $40 \text{ V} - 33,4 \text{ V} = 6,6 \text{ V}$. Επομένως, πριν τα ηλεκτρόνια συγκρουστούν με το δίσκο Δ_2 , αυτά θα συσσωρεύουν κινητική ενέργεια $E_0 = 6,6 \text{ eV}$.

Το 75 % αυτών των ηλεκτρονίων θα συγκρουστεί με την επιφάνεια του δίσκου Δ_2 και στη συνέχεια θα καταλήξουν στο θετικό πόλο της πηγής U_2 . Αλλά το 25 %, μέσα από τις οπές, θα εισέλθει στο χώρο του επιβραδυντικού πεδίου με ενέργειες $6,6 \text{ eV}$. Τα ηλεκτρόνια αυτά δεν είναι σε θέση να διαπεράσουν το απωστικό δυναμικό των 8 βολτ και επομένως δε θα καταμετρηθούν.

Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι όταν U_2 είναι 40 V , στον κύριο χώρο αναμένουμε να υπάρχουν δύο λεπτές περιοχές που εκπέμπουν φως, ενώ το νανοαμπερόμετρο θα δείχνει μηδενική τιμή.

6.6.1. Αναμενόμενη συνάρτηση “ρεύμα-τάση” στο διάστημα $0-70 \text{ V}$.

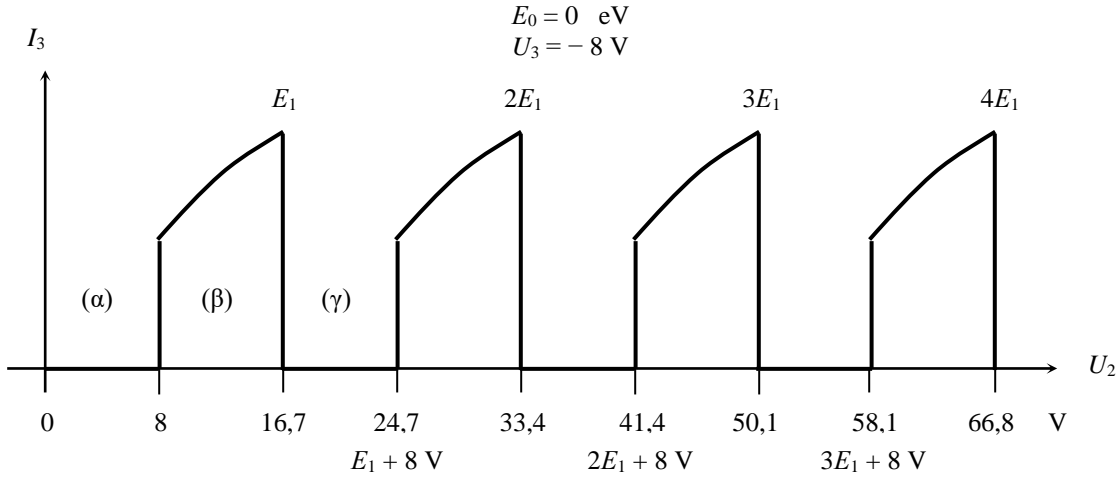
Τώρα είμαστε σε θέση να κατασκευάσουμε την αναμενόμενη συνάρτηση “ρεύμα-τάση” σε όλο το φάσμα της τάσης U_2 (διάστημα $0-70 \text{ V}$). Θεωρούμε ότι το ρεύμα μετριέται στην έξοδο του συμπαγούς δίσκου Δ_3 , από το οποίο μπορούμε κρίνουμε αν και πότε τα ηλεκτρόνια καταφθάνουν ή δεν καταφθάνουν στο συμπαγή δίσκο Δ_3 . Όταν τα ηλεκτρόνια καταφθάνουν, ο μετρητής δείχνει μία μη μηδενική τιμή, ενώ όταν δεν καταφθάνει, αναμένουμε μηδενική ένδειξη.

Στο Σχ. 6.7 δίνεται η γραφική παράσταση του ρεύματος που μετριέται από το νανοαμπερόμετρο, συναρτήσει της τάσης U_2 . Εδώ θεωρήσαμε ότι οι αρχικές ενέργειες των ηλεκτρονίων που εισέρχονται στον κύριο χώρο είναι μηδέν και ότι η τάση του επιβραδυντικού πεδίου (U_3) είναι -8 V . Επίσης, λάβαμε υπόψη το γεγονός ότι στο συμπαγή δίσκο Δ_3 θα καταφθάνουν μόνο τα ηλεκτρόνια, των οποίων η κάθετη συνιστώσα της κινητικής ενέργειάς είναι ίση ή μεγαλύτερη από 8 eV , δηλαδή εκείνα που στην *τελευταία* επιτάχυνση αποκτούν κινητικές ενέργειες $E_0 \geq 8 \text{ eV}$. Ακόμη, αγνοήσαμε τις ελαστικές κρούσεις των ηλεκτρονίων με τα άτομα του Νέου, θεωρώντας ότι τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και κινούνται ευθύγραμμα, όπως στο κενό.

Αν η υπόθεση περί μηδενισμού της κινητικής ενέργειας στις μη ελαστικές κρούσεις είναι σωστή, τότε η αναμενόμενη καμπύλη “ρεύμα-τάση” που προκύπτει από το παραπάνω μοντέλο πρέπει να είναι όμοια με αυτή που βλέπουμε στο Σχ. 6.7. Για την ερμηνεύσουμε, θεωρούμε ότι αρχικά η τάση U_2 είναι μηδέν και στη συνέχεια σταδιακά αυξάνει. Τότε σύμφωνα με το μοντέλο:

1. Όταν η τάση U_2 είναι μικρότερη από 8 V (περιοχή α), κανένα ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να φτάσει στο συμπαγή δίσκο Δ_3 και επομένως ο μετρητής ρεύματος θα δείχνει μηδενική τιμή.
2. Στην περιοχή (β), δηλαδή όπου $16,7 \text{ V} > U_2 > 8 \text{ V}$, τα ηλεκτρόνια θα εισέρχονται στο χώρο του επιβραδυντικού πεδίου με ενέργειες, σε eV , μεγαλύτερες του απωστικού δυναμικού, οπότε όσα κινούνται κάθετα προς τους δίσκους θα καταφθάνουν στο δίσκο Δ_3 και ο μετρητής ρεύματος θα δείξει μία ορισμένη μη μηδενική τιμή. Στην περιοχή αυτή αναμένουμε η αύξηση της τάσης U_2 να συνοδεύεται με ελαφρά αύξηση του ρεύματος, με τάση κορεσμού του.
3. Όταν η τάση U_2 αποκτήσει την κρίσιμη τιμή, δηλαδή $16,7 \text{ V}$, το ρεύμα του μετρητή απότομα θα μηδενιστεί, καθώς οι μη ελαστικές κρούσεις συμβαίνουν σχεδόν πάνω στην επιφάνεια του δίσκου Δ_2 και, επομένως, κινούμενα εκ' νέου προς τον δίσκο Δ_2 θα αποκτήσουν ενέργειες $E_0 \approx 0$. Τα ηλεκτρόνια αυτά δεν μπορούν να εισέλθουν στο χώρο του επιβραδυντικού πεδίου και τελικά όλα καταλήγουν στο δίσκο Δ_2 . Σημειώνουμε ακόμη όταν η τάση U_2 είναι $16,7 \text{ V}$, το ρεύμα θα μηδενιστεί, αλλά το φως ακόμη δεν αναμένεται να είναι ορατό καθότι οι αποδιεγέρσεις των ατόμων συνοδεύονται με εκπομπή υπεριώδους ακτινοβολίας.

4. Αναμένουμε ακόμη ότι το ρεύμα θα παραμένει μηδέν και στο διάστημα γ , δηλαδή όταν η τάση U_2 βρίσκεται στο διάστημα E_1, E_1+8V (16,7 - 24,7 V), καθώς εδώ στη δεύτερη επιτάχυνση οι ενέργειες των ηλεκτρονίων είναι μικρότερες από 8 eV. Για παράδειγμα, αν $U_2 = 22$ V, εκεί όπου στον κύριο χώρο το δυναμικό είναι 16,7 V, οι ενέργειές των ηλεκτρονίων μηδενίζονται. Στη διαδρομή της δεύτερης



Σχήμα 6.7. Του μοντέλου αναμενόμενη συνάρτηση “ρεύμα-τάση” στη λυχνία Νέου

επιτάχυνσης η διαφορά δυναμικού είναι μόνο $22 \text{ V} - 16,7 \text{ V} = 5,3 \text{ V}$. Επομένως, τα ηλεκτρόνια θα βομβαρδίζουν το δίσκο Δ_2 και θα εισχωρούν στο χώρο του επιβραδυντικού πεδίου με κινητικές ενέργειες $E_v = 5,3 \text{ eV}$. Τέτοια ηλεκτρόνια θα εισχωρήσουν βαθιά στο χώρο του επιβραδυντικού πεδίου, αλλά δε θα φτάσουν έως την επιφάνεια του συμπαγούς δίσκου Δ_3 , καθώς έως τα 8 eV τους υπολείπονται 2,7 eV. Έτσι, τα ηλεκτρόνια αυτά θα επιστρέψουν και τελικά θα καταλήξουν στο δίσκο Δ_2 .

Το ρεύμα στο μετρητή θα εμφανιστεί και πάλι (“θα σκάσει μύτη”) μόνο όταν τα εισερχόμενα στο επιβραδυντικό πεδίο ηλεκτρόνια έχουν κινητικές ενέργειες ίσες ή μεγαλύτερες από 8 eV. Αυτό θα συμβεί όταν η τάση U_2 είναι ίση ή μεγαλύτερη από $E_1 + 8 \text{ V}$, δηλαδή

$$U_2^* \geq E_1 + U_3 \quad , \quad (6.3)$$

όπου $U_3 = 8 \text{ V}$.

Τονίζουμε ιδιαίτερα ότι η σχέση (6.3) είναι κεφαλαίωδους σημασίας διότι επιτρέπει τον πειραματικό έλεγχο της υπόθεσης περί *μηδενισμού ή μη* της κινητικής ενέργειας στις μη ελαστικές κρούσεις. Αν οι πειραματικές μετρήσεις επιβεβαιώσουν την παραπάνω σχέση, δηλαδή το ρεύμα έχει μηδενική τιμή στο διάστημα γ , δηλαδή αρχίζει να εμφανίζεται όταν

$$U_2 = E_1 + 8 \text{ V} = 24,7 \text{ V},$$

αυτό θα συνιστά *απόδειξη*, ότι στο χώρο όπου γίνονται οι μη ελαστικές κρούσεις, οι ενέργειες των ηλεκτρονίων *μηδενίζονται*.

Πράγματι, αν το ρεύμα έπεφτε απότομα στα 16,7 V, αλλά ξαναεμφανιζόταν, για παράδειγμα, στα 19,7 V, αυτό θα σήμαινε ότι:

- α) στη δεύτερη επιτάχυνση τα ηλεκτρόνια αποκτούν ενέργεια 3 eV

β) αλλά καθώς τα ηλεκτρόνια καταμετρώνται, δηλαδή καταφθάνουν έως το συμπαγή δίσκο Δ_3 , μετά την κρούση με τα άτομα στα ηλεκτρόνια απομένουν 5 eV ενέργειας, δηλαδή η ενέργειά τους δε μηδενίζεται. Επομένως αν οι ενέργειες των ηλεκτρονίων μηδενίζονται ή δε μηδενίζονται εξαρτάται από το αν η περιοχή γ έχει ή δεν έχει πλάτος U_3 , δηλαδή 8 V!

Ανακεφαλαιώνοντας την ανάλυση και γενικεύοντας λίγο τα συμπεράσματα μπορούμε να πούμε ότι:

1. Το ρεύμα στο μετρητή αναμένουμε να μηδενίζεται όταν η τάση U_2 είναι ακέραια πολλαπλάσια της E_1 , δηλαδή στα σημεία

$$U_{2,k} = kE_1, \quad (6.4)$$

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

2. Το ρεύμα στο μετρητή έχει μηδενική τιμή και στο επόμενο διάστημα των 8 V, δηλαδή σε διάστημα, όσο είναι το απωστικό δυναμικό U_3 που εφαρμόζεται στο συμπαγή δίσκο Δ_3 .
3. Το ρεύμα επανεμφανίζεται (“σκάει μύτη”) στα σημεία που βρίσκονται δεξιότερα από τα σημεία kE_1 κατά U_3 , δηλαδή στα σημεία

$$U_{2,k}^* = kE_1 + U_3 \quad (6.5)$$

Βιβλιογραφία

- 1.A.C. Melissinos, *Experiments in Modern Physics*. (Academ Press Inc. 1967), σελ. 8 – 17
- 2.H.D. Young, *Φυσική, Τομος Β', Ηλεκτρομαγνητισμός, Οπτική και Σύγχρονη Φυσική*. (Παπαζήσης, Αθήνα, 1994, σελ. 1111-1123)
- 3.D. W. Preston and E. R. Dietz, *The Art of Experimental Physics*, (J. Wiley & Sons Inc. 1991), σελ. 197 – 208
- 4.Haliday – Resnick, *Physics, Parts I & II*. (J. Wiley & Sons Inc. 1966), σελ. 599 – 602

6.7. 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 κάνει δυνατό τον υπολογισμό της αρχικής ενέργειας E_0 με την οποία τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στον κύριο χώρο, όταν η τάση U_1 είναι 2,00 V (βλ. Παράρτημα 3).

Στο δεύτερο πείραμα θα μετρηθεί η κρίσιμη ενέργεια διέγερσης E_1 και θα ελεγχθεί πειραματικά η υπόθεση περί μηδενισμού της κινητικής ενέργειας στις μη ελαστικές κρούσεις. Η ενέργεια E_1 θα μετρηθεί μέσω καταγραφής του ρεύματος των ηλεκτρονίων που καταφθάνουν στο συμπαγή δίσκο Δ_3 , συναρτήσει της τάσης U_2 που δρα στον κύριο χώρο της λυχνίας (καμπύλη “ρεύμα-τάση”).

Υπενθυμίζουμε ότι η πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα κιβώτιο-βάση με τη λυχνία Νέου. Στο εσωτερικό του κιβωτίου είναι ενσωματωμένες 4 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 (ναοαμπερόμετρο), για τη μέτρηση του ρεύματος των ηλεκτρονίων που καταφθάνουν στο συμπαγή δίσκο Δ_3 .

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

1. Συναρμολογήστε το κύκλωμα που δίνεται στο Σχ. 6.4.
2. Θέσατε σε λειτουργία τη ηλεκτρονική συσκευή. Αυτόματα αρχίζει η θέρμανση της καθόδου της λυχνίας. Αναμένετε 3-4 λεπτά έως ότου σταθεροποιηθεί η θερμοκρασία της καθόδου.
3. Ρυθμίστε όλες τις τάσεις στο μηδέν.

Σημείωση.

Θεωρητικά, για την καταγραφή αυτής της καμπύλης θέλουμε μία δίοδο με τα εξεταζόμενα ηλεκτρόδια, δηλαδή την κάθοδο (LaB_6) και την άνοδο (Ni), ενώ το θερμοιονικό ρεύμα πρέπει να μετρείται στην άνοδο,

δηλαδή ο μετρητής ρεύματος πρέπει να βρίσκεται μεταξύ του δίσκου A_1 και του θετικού πόλου της πηγής τάσης U_1 . Το θερμιονικό ρεύμα αναμένεται να ακολουθεί το νόμο “3/2”, όταν μεταβάλλεται η τάση U_1 (βλ. Άσκηση 25), αλλά η καμπύλη εμφανίζεται μετατοπισμένη προς τις θετικές τιμές της ανοδικής τάσης, όταν το δυναμικό επαφής είναι επιβραδυντικό. Το δυναμικό επαφής, σε V, μετρείται μέσω μέτρησης αυτής της μετατόπισης (Παράρτημα 3).

Δυστυχώς, η διάταξη δεν παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης του ρεύματος στο δίσκο A_1 . Το ρεύμα μπορεί να μετρηθεί μόνο στην έξοδο του συμπαγούς δίσκου A_3 . Η δυσκολία αυτή παρακάμπτεται ως εξής. Αντί του ολικού ρεύματος ηλεκτρονίων που καταφθάνουν στο A_1 , μπορεί να μετρηθεί ένα μέρος του, δηλαδή το 25 % που περνά μέσα από τις οπές και είναι ανάλογο του ολικού. Αλλά για να διαπεράσουν τα ηλεκτρόνια αυτά και το δεύτερο διάτρητο δίσκο A_2 και να καταλήξουν τελικά στο συμπαγή δίσκο A_3 , όπου έχουμε το μετρητή, τα ηλεκτρόνια πρέπει να υποβοηθηθούν με μία μικρή θετική τάση μεταξύ των δύο διάτρητων δίσκων. Επίσης, πρέπει να μηδενιστεί το απωστικό δυναμικό στο συμπαγή δίσκο A_3 . Έτσι,

4. Ρυθμίστε την υποβοηθητική τάση U_2 στα 2,00 V, την $U_3 = 0$ V και μετρήστε το ρεύμα ηλεκτρονίων που καταφθάνουν στο συμπαγή δίσκο A_3 συναρτήσει της τάσης U_1 , στο διάστημα 0 – 3 V, με βήμα 0,1 V. Στο πείραμα αυτό η συσκότιση δεν είναι απαραίτητη.

6.7.2. Καταγραφή της καμπύλης “ρεύμα-τάση” στο διάστημα 0-80 V

Πριν γίνει η καταγραφή, δείτε πρώτα πως δημιουργούνται και πως εξελίσσονται και μετακινούνται οι φωτεινές ζώνες στον κύριο χώρο, καθώς η τάση U_2 αυξάνει από 0 έως 80 V. Εδώ είναι απαραίτητη μερική συσκότιση.

1. Για να δείτε τις φωτεινές ζώνες, ρυθμίστε την τάση U_1 στα 2,00 V, ενώ την τάση U_3 στα –8,00 V.
2. Σαρώστε 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, διαδοχικά θα εμφανιστούν τρεις φωτεινές ζώνες στον κύριο χώρο της λυχνίας.
3. Μηδενίστε και πάλι την τάση U_2 και, στο διάστημα 0 – 80 V, καταγράψατε το ρεύμα των ηλεκτρονίων που καταφθάνουν στο συμπαγή δίσκο A_3 , συναρτήσει της τάσης U_2 ($I_3 = f(U_2)$). Το βήμα της τάσης είναι 1 V, αλλά στην περιοχή μείωσης του ρεύματος το βήμα μειώνεται στα 0,5 V. Και εδώ η συσκότιση δεν είναι απαραίτητη.
4. Ρυθμίστε όλες τις τάσεις στο μηδέν και κλείστε την τροφοδοσία του κιβωτίου. Επίσης, κλείστε και τα δύο ψηφιακά πολύμετρα προκειμένου να μην αδειάσουν οι μπαταρίες τους.

6.8. Επεξεργασία των μετρήσεων

6.8.1. Μέτρηση του δυναμικού επαφής των ηλεκτροδίων $LaB_6 - Ni$

1. Από την πρώτη γραφική παράσταση “ρεύμα-τάση” μετρήστε τη μετατόπιση της καμπύλης, σε βολτ, η οποία αντιστοιχεί στο δυναμικό επαφής του συστήματος $LaB_6 - Ni$. Συγκρίνετε την τιμή που μετρήσατε με τη θεωρητική (1,82 V).
2. Υπολογίστε (εκτιμήστε) την αρχική ενέργεια E_0 με την οποία τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στον κύριο χώρο κατά τη διάρκεια του δεύτερου πειράματος, όταν $U_1 = 2,00$ V.

6.8.2. Μέτρηση της ενέργειας διέγερσης E_1 .

1. Σύντομα σχολιάστε τα φαινόμενα που παρατηρήσατε στον κύριο χώρο καθώς η τάση U_2 αυξανόταν από μηδέν έως 80 V.
2. Από τη δεύτερη καμπύλη $I_3 = f(U_2)$, υπολογίστε την ενέργεια διέγερσης E_1 .
3. Εξηγήστε, πως από τις πειραματικές σας μετρήσεις προκύπτει το συμπέρασμα ότι στις μη ελαστικές κρούσεις των ηλεκτρονίων με τα άτομα οι κινητικές ενέργειες των ηλεκτρονίων μηδενίζονται.
4. Η καμπύλη $I_3 = f(U_2)$ που σχεδιάσατε διαφέρει από την αναμενόμενη. Εξηγήστε, ποιοι παράγοντες ευθύνονται για αυτό.

5. Μετά την πρώτη κορυφή το ρεύμα δε 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 A_2 .
6. Ως προς τα σφάλματα. Το μέγεθος που μετριέται είναι η ενέργεια διέγερσής του ατόμου E_1 . Καθώς αυτή μετριέται από τη γραφική παράσταση, το σφάλμα 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.
7. Εξηγήστε, πόσο θα επηρεάσει την ακρίβεια μέτρησης της E_1 το γεγονός ότι το ναοαμπερόμετρο συστηματικά παρουσιάζει αυξημένες τιμές του ρεύματος κατά 100% ; Για παράδειγμα, ο μετρητής δείχνει 4 nA , ενώ η πραγματική τιμή είναι 2 nA .
8. Δώστε σύντομη περιγραφή του αυτοσχέδιου ηλεκτρόμετρου και σχολιάστε το ρόλο του πυκνωτή.

Παραρτήματα

6.9. Παράρτημα 1

6.9.1. Ερμηνεία της πειραματικής καμπύλης

Η πειραματική καμπύλη διαφέρει από αυτή του μοντέλου (Σχ. 6.7). Για παράδειγμα, οι κορυφές δεν έχουν σταθερό ύψος. Μετά την κορυφή, η πτώση του ρεύματος δεν είναι απότομη και, καθώς μεταξύ καθόδου και πρώτου διάτρητου δίσκου εφαρμόζεται τάση επιτάχυνσης 2 V , η πρώτη κορυφή δε βρίσκεται στα $14,7\text{ V}$ κ.ο.κ.

6.9.2. Η μη μετατόπιση της πρώτης κορυφής

Στην Άσκηση, στον πρώτο διάτρητο δίσκο εφαρμόζεται θετική τάση U_1 (ως προς την κάθοδο) 2 V . Αν δε λάβουμε υπόψη το δυναμικό επαφής μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων, τότε εσφαλμένα θα συμπεραίνουμε ότι τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στον κύριο χώρο της λυχνίας με αρχικές ενέργειες 2 eV . Αλλά τότε τα ηλεκτρόνια πρέπει να αποκτούν την ενέργεια διέγερσης ($16,7\text{ eV}$) όταν στο δεύτερο διάτρητο δίσκο η τάση U_2 είναι $14,2\text{ V}$, δηλαδή η πρώτη κορυφή πρέπει να είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά κατά 2 V και να βρίσκεται στο σημείο $U_2 = 14,2\text{ V}$.

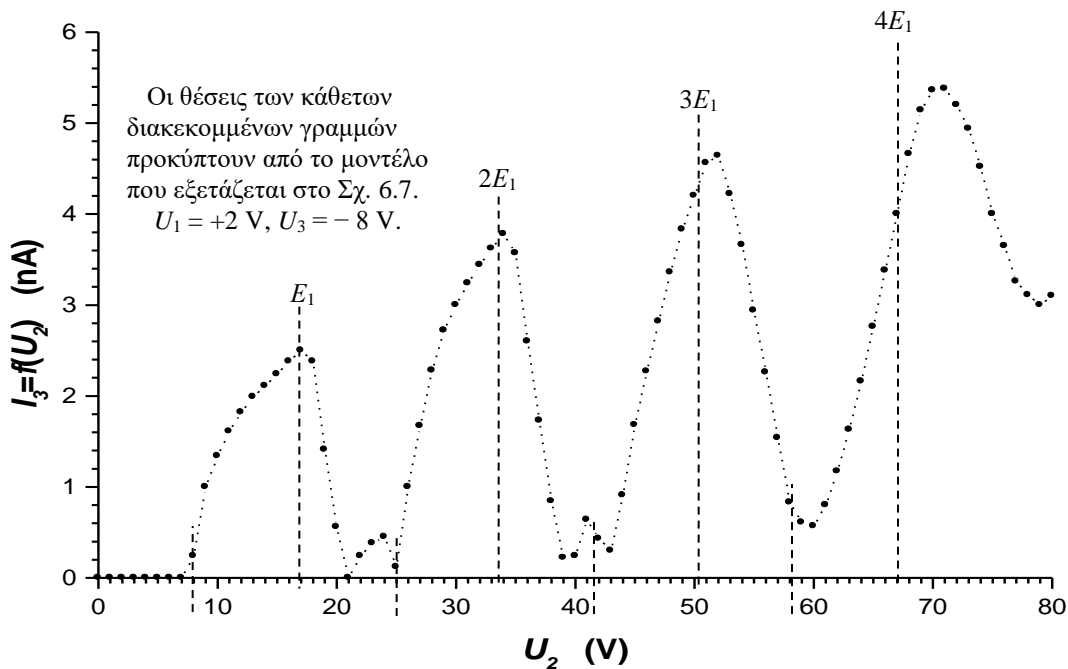
Αν εξετάσουμε προσεκτικά την πειραματική καμπύλη που βλέπουμε στο Σχ. 6.8, θα διαπιστώσουμε ότι μία μετατόπιση της πρώτης κορυφής κατά 2 V είναι ανιχνεύσιμη, αλλά για κάποιο λόγο η κορυφή αυτή δεν είναι μετατοπισμένη και βρίσκεται στο σημείο $\approx 17\text{ V}$, δηλαδή εκεί όπου πρέπει ($16,7\text{ V}$). Αυτό σημαίνει όμως ότι στον κύριο χώρο της λυχνίας τα ηλεκτρόνια εισέρχονται με περίπου μηδενικές αρχικές ενέργειες. Αλλά τότε γεννάται το ερώτημα: για ποιο λόγο τα 2 V βόλτ δεν επιταχύνουν τα ηλεκτρόνια;

Ερμηνεία. Η μη επιτάχυνση των ηλεκτρονίων με τα 2 V (μη μετατόπιση της κορυφής) οφείλεται στο δυναμικό επαφής που δρα μεταξύ καθόδου και του δίσκου A_1 . Το δυναμικό αυτό είναι $1,82\text{ V}$. Επομένως όταν $U_1 = 2\text{ V}$, τα $1,82\text{ V}$ αυτής της τάσης εξουδετερώνουν το δυναμικό επαφής, ενώ το υπόλοιπο $0,18\text{ V}$ επιταχύνει τα ηλεκτρόνια και τα εισάγει στον κύριο χώρο με ενέργειες $0,18\text{ eV}$.

Θεωρητικά, η πρώτη κορυφή πρέπει να είναι μετατοπισμένη κατά $0,18\text{ V}$, αλλά από την πειραματική καμπύλη είναι αδύνατο να διακρίνει κανείς αυτήν τη μετατόπιση.

6.9.3. Παράγοντες που παραμορφώνουν την αναμενόμενη καμπύλη.

Σε γενικές γραμμές, η πειραματική καμπύλη που καταγράφεται ακολουθεί την αναμενόμενη (βλ. Σχ. 6.7 και 6.8). Αλλά υπάρχουν και διαφορές. Έτσι, οι θέσεις των τελευταίων δύο κορυφών διαφέρουν από τις αναμενόμενες και επομένως εδώ η μέτρηση της E_1 είναι επισφαλής. Είναι προτιμότερο η μέτρηση της E_1 να γίνει από τις πρώτες δύο κορυφές, όπου οι συνθήκες που επικρατούν στη λυχνία λιγότερο διαφέρουν από αυτές που υποθέσαμε στο μοντέλο. Πρόσθετες διαφορές εντοπίζονται στο μη απότομο μηδενισμό του ρεύματος και στις μικρές κορυφές εκεί όπου το ρεύμα θα έπρεπε να ήταν μηδέν. Επίσης, τα ύψη των κορυφών δεν είναι σταθερά και αυξάνονται μαζί με την U_2 .



Σχήμα 6.8. Τυπική πειραματική καμπύλη “ρεύμα-τάση” της λυχνίας Νέου.

Την παραμόρφωση της αναμενόμενης καμπύλης την προκαλούν παράγοντες που δε λάβαμε υπόψη στην ανάλυση του μοντέλου. Οι παράγοντες αυτοί είναι:

1. Ιονισμός των ατόμων Νέου.

Η αύξηση του ύψους των κορυφών στην πειραματική καμπύλη οφείλεται στον ιονισμό των ατόμων Νέου. Σύμφωνα με το ενεργειακό διάγραμμα του Νέου, ο ιονισμός των ατόμων παρατηρείται όταν η ενέργεια του ελεύθερου ηλεκτρονίου είναι ίση ή μεγαλύτερη από 21,6 eV.

Στην προηγούμενη ανάλυση υποθέσαμε ότι στον κύριο χώρο, λόγω μεγάλης συγκέντρωσης των ατόμων Νέου στη λυχνία, το ελεύθερο ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να αποκτήσει ενέργεια μεγαλύτερη από 16,7 eV, ακόμα και όταν η τάση U_2 έχει πολύ μεγαλύτερη τιμή. Ο ισχυρισμός αυτός είναι σωστός, αλλά με στατιστική έννοια. Το ζήτημα είναι ότι ένα ηλεκτρόνιο που έχει ενέργεια 16,7 eV μπορεί να συγκρουστεί με άτομο του Νέου, αλλά μπορεί και να μη συγκρουστεί εάν στο σημείο όπου η ενέργειά του είναι 16,7 eV δεν παραβρίσκεται άτομο. 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, η σύγκρουση έχει στατιστικό χαρακτήρα και εξαρτάται από τη συγκέντρωση των ατόμων Νέου 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.

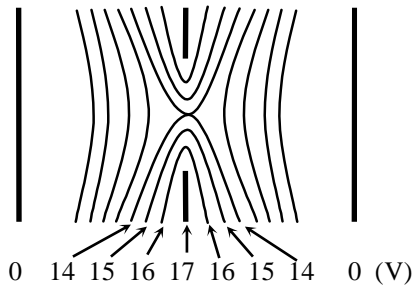
Από τα παραπάνω προκύπτει ότι όταν η τάση U_2 είναι μεγαλύτερη από 21,6 eV, ο ιονισμός του Νέου θα προκαλέσει εμφάνιση νέων και πρόσθετων φορέων ηλεκτρισμού στον κύριο χώρο της λυχνίας.

Γενικά, σε τάσεις άνω των 21,6 V, η γέννηση νέων φορέων πολύ έντονα εξαρτάται από την τάση. Αυτό προκαλεί πρόσθετη και ραγδαία αύξηση του ρεύματος όταν η U_2 υπερβαίνει το δυναμικό ιονισμού. Επομένως, μετά τα 21,6 V, αναμένουμε το ρεύμα στη λυχνία συστηματικά να αυξάνει.

2. Ανομοιογένεια του ηλεκτρικού πεδίου στις οπές του διάτρητου δίσκου Δ_2

Από την πειραματική καμπύλη προκύπτει ότι μετά την κορυφή, ο μηδενισμός του ρεύματος εξελίσσεται σε διάστημα περίπου 4-5 V, ενώ σύμφωνα με το μοντέλο, πρέπει να είναι απότομος.

Ερμηνεία. Ο μη απότομος μηδενισμός προκαλείται από την ανομοιογένεια του ηλεκτρικού πεδίου στην επιφάνεια των οπών του διάτρητου δίσκου Δ_2 . Όταν στο δίσκο εφαρμόζεται τάση, για παράδειγμα, 17 V, αυτό δε σημαίνει ότι όλα τα ηλεκτρόνια που καταφθάνουν στο δίσκο αποκτούν ενέργειες 17 eV, καθώς το δυναμικό αυτό υπάρχει μόνο πάνω στη μεταλλική επιφάνεια του δίσκου. Στις οπές και ιδίως στο κέντρο των οπών, το δυναμικό είναι κατά μερικά βολτ μικρότερο (14 V, βλ. Σχ.). Επομένως όταν τα ηλεκτρόνια διαπερνούν μία οπή, οι κινητικές ενέργειες που αποκτούν εξαρτάται από το πόσο αυτά απέχουν από το κέντρο της οπής. Έτσι, 14 eV θα αποκτήσουν τα ηλεκτρόνια που περνάνε ακριβώς από το κέντρο, ενώ 17 eV θα αποκτήσουν αυτά που κινούνται πολύ κοντά από την περιφέρεια της οπής. Συνεπώς μετά την οπή, στις ενέργειες των ηλεκτρονίων δημιουργείται μία διασπορά ενεργειών της τάξης μερικών βολτ.



Η σχετική ανάλυση δείχνει ότι η μείωση του δυναμικού στο κέντρο της οπής εξαρτάται από τη διάμετρό, όπως επίσης και την απόσταση μεταξύ των δύο δίσκων. Συνεπώς, όταν το δυναμικό του δίσκου Δ_2 είναι, για παράδειγμα, 17 V, μόνο μία πολύ λεπτή λωρίδα στην περιφέρεια της οπής έχει δυναμικό E_1 και, συνεπώς, μονό ένα μικρό μέρος των ηλεκτρονίων αποκτά την ενέργεια E_1 , συγκρούεται μη ελαστικά και αποκόπτεται από τη ροή των ηλεκτρονίων που καταφθάνει στο συμπαγή δίσκο Δ_3 . Τα υπόλοιπα ηλεκτρόνια διασχίζουν την επιφάνεια της οπής με ενέργειες μικρότερες από την E_1 , δε συγκρούονται μη ελαστικά, δε μηδενίζουν την

κινητική τους ενέργεια και καταφθάνουν στο συμπαγή δίσκο Δ_3 . Το ρεύμα στο μετρητή θα αρχίσει να μειώνεται όταν αυξάνοντας σταδιακά την τάση U_2 οι μη ελαστικές κρούσεις “αποκολληθούν” από την επιφάνεια της οπής και αρχίσουν να γίνονται λίγο πιο αριστερά. Ο δε μηδενισμός του ρεύματος θα γίνει όταν ακόμη και στα κέντρα των οπών το δυναμικό θα είναι λίγο μεγαλύτερο από 16.7 V. 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.

6.10. Παράρτημα 2

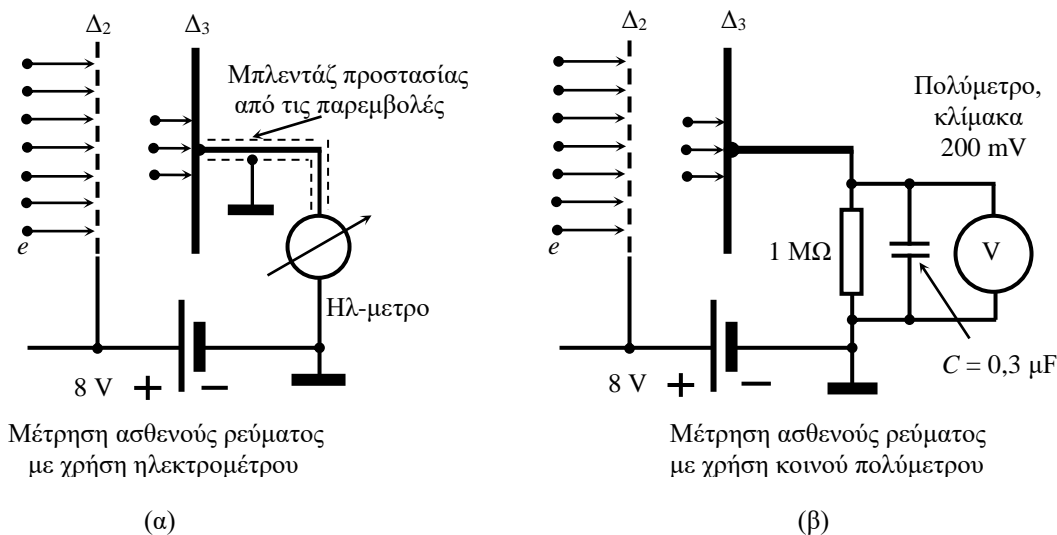
6.10.1. Αυτοσχέδιο ηλεκτρόμετρο της Άσκησης

Ο όρος $E_0 \approx 0$ eV οδηγεί σε πειράματα με μικρά ρεύματα της θερμοϊονικής εκπομπής. Έτσι στο πείραμα, ο αριθμός των ηλεκτρονίων που καταφθάνουν στο συμπαγή δίσκο Δ_3 είναι της τάξης μερικών νανοαμπέρ (10^{-9} A).

Με τα κοινά ψηφιακά πολύμετρα είναι αδύνατο να μετρηθούν τόσο μικρά ρεύματα, ακόμα και στην πιο ευαίσθητη κλίμακα των 200 μ A, όπου η διακριτική ικανότητα είναι 0,1 μ A ή 10^{-7} A.

Όμως οι ανάγκες του πειράματος απαιτούν από το μετρητή ακρίβεια και διακριτική ικανότητα της τάξης 0,1 nA ή 10^{-10} A. Η μέτρηση τόσο μικρών ρευμάτων γίνεται με ειδικά ηλεκτρονικά όργανα που ονομάζονται *ηλεκτρόμετρα* (Σχ.6.9α). Τα όργανα αυτά είναι ακριβά και δυσεύρετα. Εντωμεταξύ, το ρεύμα 10^{-10} A μπορεί να μετρηθεί και με ένα κοινό πολύμετρο.

Σωστά ειπώθηκε προηγουμένως ότι η ευαισθησία και η διακριτική ικανότητα του κοινού πολυμέτρου δεν επαρκεί, αλλά όταν αυτό χρησιμοποιείται ως μετρητής ρεύματος. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται αν με το ίδιο όργανο συναρμολογήσουμε ένα υποτυπώδες αυτοσχέδιο ηλεκτρόμετρο. Δηλαδή το κοινό πολύμετρο να το χρησιμοποιήσουμε ως μετρητής τάσης και όχι ρεύματος, μετρώντας την πτώση τάσης που δημιουργεί το μετρούμενο ρεύμα σε μία ειδική αντίσταση, κατά προτίμηση μεγάλης και βολικής τιμής. Αυτή είναι η αρχή λειτουργίας κάθε ηλεκτρομέτρου (Σχ. 6.9β).



Σχήμα 6.9. Συνδεσμολογία του ηλεκτρομέτρου αγοράς (α) και του αυτοσχέδιου ηλεκτρομέτρου (β)

Επειδή η εσωτερική αντίσταση του πολύμετρου της Άσκησης είναι 100 ΜΩ, τη μετρική αντίσταση μπορούμε να την επιλέξουμε, για παράδειγμα, 1 ΜΩ. Με την επιλογή αυτή μόνο το 1 % του μετρούμενου ρεύματος θα παρακάμπτει τη μετρητική αντίσταση και θα διακλαδώνεται προς το εσωτερικό του μετρητή. Συνεπώς η πτώση τάσης στη μετρητική αντίσταση θα είναι μικρότερη από αυτή που θα προκαλούσε όλο το ρεύμα κατά 1 %. Το συστηματικό αυτό σφάλμα είναι μικρό και μπορεί να αγνοηθεί.

Όταν το πολύμετρο των 4,5 ψηφίων λειτουργεί ως μετρητής τάσης DC (συνεχές ρεύμα), η πιο ευαίσθητη κλίμακα του οργάνου είναι 200 mV, με διακριτική ικανότητα 0,01 mV.

Έστω ότι κάποιο ρεύμα διαρρέει τη μετρική αντίσταση και ο μετρητής δείχνει την ελάχιστη τιμή, δηλαδή 0,01 mV. Το ρεύμα που δημιουργεί την τάση αυτή είναι

$$I = \frac{U}{R} = \frac{0,01 \text{ mV}}{1 \text{ M}\Omega} = \frac{10^{-5} \text{ V}}{10^6 \Omega} = 10^{-11} \text{ A} = 0,01 \text{ nA} ! \quad (6.6)$$

Συνεπώς, αν στην ψηφιακή οθόνη του μετρητή τάσης εμφανιστεί η ένδειξη, για παράδειγμα, 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 βλέπετε στην οθόνη του μετρητή τα αντιγράφετε σε μονάδες nA, δίχως να χρησιμοποιείτε κάποιον πολλαπλασιαστικό παράγοντα.

6.10.2. Ο ρόλος του πυκνωτή

Επειδή τα καλώδια του μετρητή είναι απροστάτευτα (δεν είναι μέσα σε μπλεντάζ), αυτά είναι ευάλωτα στην εναλλασσόμενη τάση των 50 Hz της ΔΕΗ. Για να μειωθεί η επαγόμενη τάση, παράλληλα στη μετρητική αντίσταση 1 ΜΩ συνδέεται ένας πυκνωτής, η χωρητικότητα του οποίου είναι 0,3 μF. Το συνεχές ρεύμα αυτός ο πυκνωτής δε θα επηρεάσει, αλλά θα προστατέψει το πολύμετρο, μειώνοντας την επαγόμενη τάση από το δίκτυο της ΔΕΗ, τόσες φορές, όσο η “πυκνωτική αντίσταση” του πυκνωτή, στα 50 Hz, είναι μικρότερη του 1 ΜΩ.

Η “πυκνωτική 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 του 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, καθώς αλλάζετε την τάση U_2 , μη σπεύδετε αμέσως να καταγράψετε τη νέα τιμή του ρεύματος. Περιμένετε να περάσουν $1,5 \approx 2$ δευτερόλεπτα ($5 \approx 6RC$) και μόνο τότε σημειώστε τη νέα τιμή.

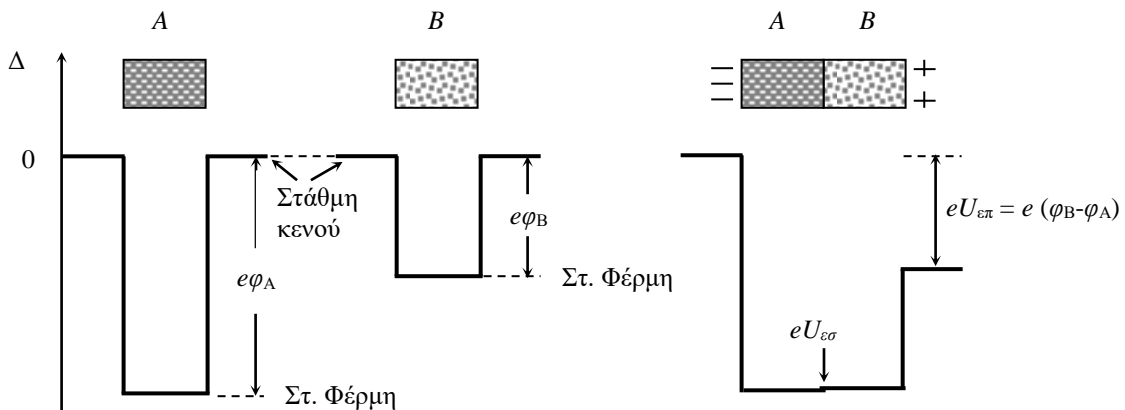
6.11. Παράρτημα 3

6.11.1. Εξωτερικό δυναμικό επαφής δύο μετάλλων

Όταν δύο διαφορετικά μέταλλα έρχονται σε επαφή, στο σημείο επαφής δημιουργείται μία μικρή διαφορά δυναμικού, το λεγόμενο εσωτερικό δυναμικό επαφής, η τιμή του οποίου είναι της τάξης 1-10 mV. Το δυναμικό αυτό συχνά το αποκαλούν και δυναμικό Πελτιέ (Peltier, βλ. Άσκηση “Βαθμονόμηση θερμοζεύγους”). Αλλά διαφορά δυναμικού δημιουργείται και μεταξύ των ελεύθερων άκρων των δύο μετάλλων, μόνο που η διαφορά αυτή είναι εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη και είναι της τάξης μερικών βολτ! Η τάση που δημιουργείται στα ελεύθερα άκρα των δύο μετάλλων ονομάζεται *εξωτερική διαφορά δυναμικού επαφής*. Ας δούμε πως αυτή δημιουργείται.

Έστω ότι έχουμε δύο μέταλλα: το μέταλλο A και το μέταλλο B . Έστω φ_A και φ_B είναι τα έργα εξαγωγής των ηλεκτρονίων από τα μέταλλα A και B , αντίστοιχα. Έστω ακόμη ότι τα μέταλλα, πριν έρθουν σε επαφή, δεν ήταν ηλεκτρικά φορτισμένα.

Στο Σχ. 6.11 παρουσιάζεται η δυναμική ενέργεια του ηλεκτρονίου μέσα και έξω από τα μέταλλα, πριν αυτά έλθουν σε επαφή και μετά. Η δυναμική ενέργεια του ηλεκτρονίου έξω από τα μέταλλα ορίζεται μηδενική. Το ουσιώδες εδώ είναι ότι όταν τα μέταλλα έρθουν σε επαφή, οι πυθμένες των δυναμικών πηγαδιών, δηλαδή η στάθμη Fermi των δύο μετάλλων, αποκτούν ενιαία τιμή, ενώ πριν την επαφή οι στάθμες αυτές διέφεραν.



Σχήμα 6.10. Δυναμική ενέργεια του ηλεκτρονίου μέσα και έξω από τα μέταλλα.

Μετά την επαφή, στο σημείο επαφής δημιουργείται ένα μικρό εσωτερικό σκαλοπατάκι δυναμικής ενέργειας που μπορούμε να το αγνοήσουμε, αλλά η δυναμική ενέργεια του ηλεκτρονίων που βρίσκονται

στην εξωτερική επιφάνεια των δύο μετάλλων θα έχουν διαφορετική τιμή. Όπως βλέπουμε (Σχ.6.10), η διαφορά αυτή είναι

$$U_{\varepsilon\pi} = \varphi_B - \varphi_A. \quad (6.7)$$

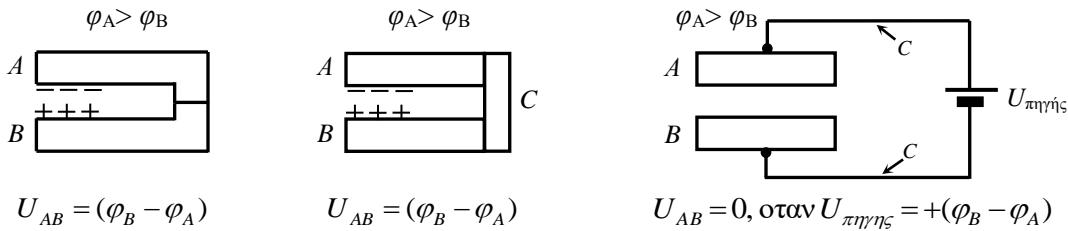
Έτσι, μεταξύ των ελεύθερων άκρων των δύο μετάλλων θα δημιουργηθεί ηλεκτρικό πεδίο και επομένως αυτά θα φορτιστούν: το μέταλλο που έχει μικρό έργο εξαγωγής, με θετικά φορτία, ενώ το άλλο θα φορτιστεί με αρνητικά.

Σημειώνουμε ότι το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο επαφής μεταξύ των μετάλλων A και B εξαρτάται *μόνο* από τα έργα εξαγωγής των δύο αυτών μετάλλων, παρά το ότι στις εφαρμογές μεσολαβή συνήθως και ένα τρίτο μέταλλο (το C , στο Σχ. 6.11). Πράγματι, και σε αυτήν την περίπτωση η τάση στα ελευθέρια άκρα είναι:

$$U_{AB} = (\varphi_C - \varphi_A) + (\varphi_B - \varphi_C) = \varphi_B - \varphi_A,$$

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

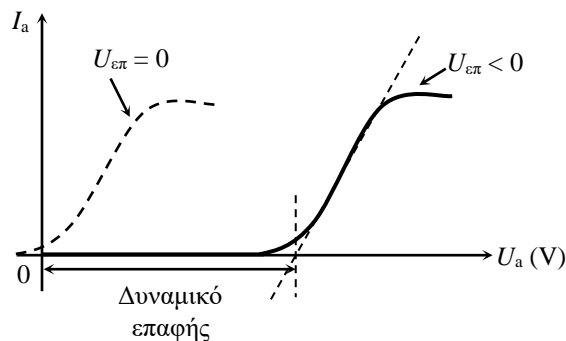
Στα πειράματα και σε εφαρμογές, τα ενδιάμεσα μέταλλα μπορούν να είναι περισσότερα του ενός. Είναι εύκολο να δείξει κανείς ότι όπως και στην περίπτωση του μετάλλου C , η εξωτερική τάση επαφής των μετάλλων A και B εξαρτάται *μόνο* από τα έργα εξόδου αυτών των μετάλλων και, επομένως, δεν εξαρτάται από τα έργα εξόδου των ενδιάμεσων μετάλλων.



Σχήμα 6.11

6.11.2. Μέτρηση του εξωτερικού δυναμικού επαφής δύο μετάλλων

Σε μία διάταξη θερμοionικής εκπομπής, όπως είναι η δίοδος κενού, το δυναμικό επαφής μπορεί να μετρηθεί. Για το σκοπό αυτό καταγράφουν τη συνάρτηση “ρεύμα-τάση” της δίοδου και από την καταγραφή αυτή μετράνε τη μετατόπιση της καμπύλης (Σχ. 6. 12), η οποία άμεσα συνδέεται με το δυναμικό επαφής.



Σχήμα 6.12. Μετατόπιση της καμπύλης $I_a = f(U_a)$ λόγω αρνητικού δυναμικού επαφής της ανόδου

Όταν, για παράδειγμα, η διαφορά δυναμικού επαφής είναι μηδέν, στο νόμο 3/2 (βλ. Άσκηση 25) η άνοδος του ανοδικού ρεύματος αρχίζει από τις μηδενικές τιμές της ανοδικής τάσης (Σχ. 6.12). Όταν όμως η διαφορά δυναμικού επαφής δεν είναι μηδέν και η άνοδος φέρει αρνητικό φορτίο, όπως στην Άσκηση, τότε το ανοδικό ρεύμα θα έχει μηδενική τιμή όσο $U_a \leq U_{\text{επαφής}}$. Το ανοδικό ρεύμα θα αρχίσει να αυξάνει μόνο όταν $U_a \geq U_{\text{επαφής}}$. Επομένως το δυναμικό επαφής μετατοπίζει την καμπύλη “ρεύμα-τάση” όσο είναι το δυναμικό επαφής, όπως στο Σχ. 6.12, όπου το έργο εξόδου της ανόδου είναι μεγαλύτερο από αυτό της καθόδου. Στην αντίθετη περίπτωση η μετατόπιση της καμπύλης γίνεται προς τις αρνητικές τιμές της ανοδικής τάσης.

Τέλος, η μέθοδος που εξετάσαμε είναι αρκετά εξελιγμένη εναλλακτική μέθοδος μέτρησης του έργου εξαγωγής κάποιας άγνωστης ουσίας, όταν το έργο εξαγωγής της δεύτερης, της ανόδου ή της καθόδου, είναι γνωστό με μεγάλη ακρίβεια.