

Ćwiczenie: A1

Tytuł ćwiczenia: Doświadczenie Francka-Hertza

I. Cel ćwiczenia

Zadaniem studenta jest powtórzenie historycznego doświadczenia Francka-Hertza. Badania polegają na pomiarach przebiegu natężenia prądu kolektora lampy wypełnionej parami rtęci w funkcji napięcia przyspieszającego elektrony w obszarze między katodą i siatką, co umożliwi wyznaczenie energii pierwszego poziomu wzbudzonego dla rtęci.

II. Zakres ćwiczenia (zadania do wykonania)

1. Zestawienie i uruchomienie układu pomiarowego wg załączonych schematów i instrukcji.
2. Pomiar natężenia prądu kolektora (I_a) w funkcji napięcia przyspieszającego (U_p).
3. Sporządzenie wykresów $I_a(U_p)$.
4. Wyznaczenie energii pierwszego poziomu wzbudzonego atomu rtęci.

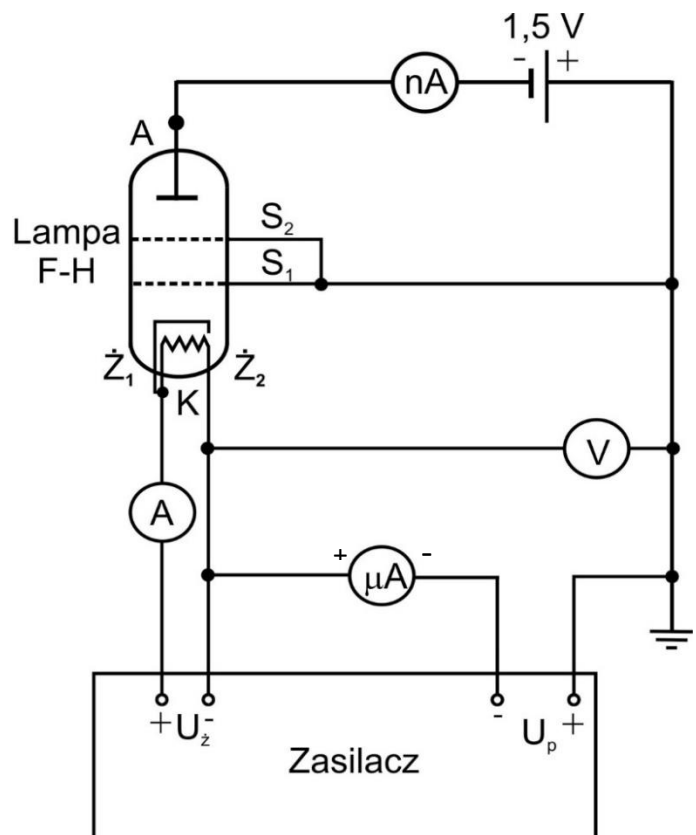
III. Zagadnienia do kolokwium

1. Budowa atomu, model atomu Bohra, serie widmowe, reguły wyboru.
2. Atom wodoru w mechanice kwantowej, równanie Schrödingera, liczby kwantowe.
3. Atomy wieloelektronowe. Model wektorowy atomu. Struktura subtelna i nadsubtelna. Sprzężenie L-S, j-j.
4. Stany wzbudzone i jonizacja atomu.
5. Zderzenia atomów.
6. Termoemisja.

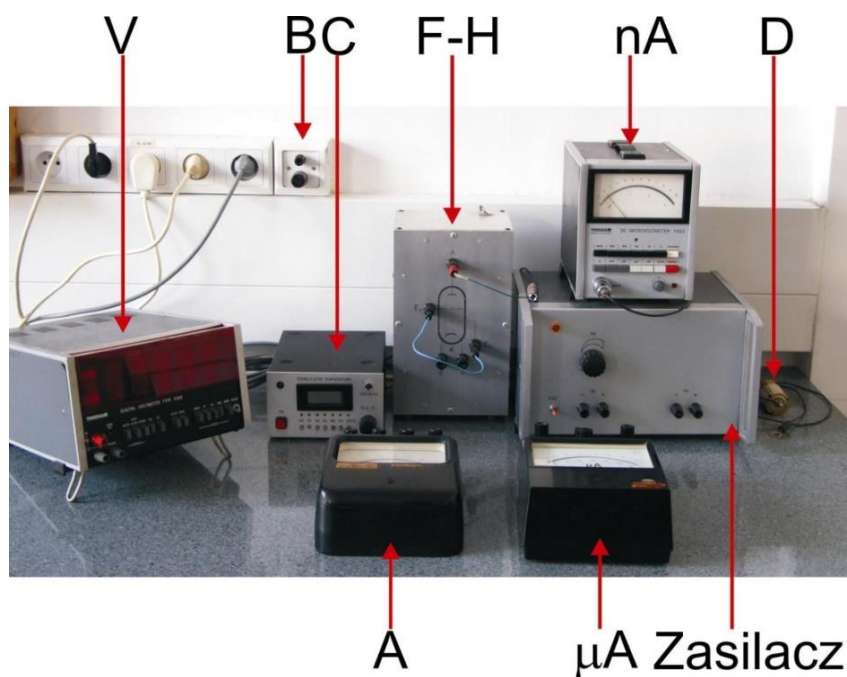
IV. Opis urządzeń i przyrządów używanych w eksperymencie

1. Schemat blokowy aparatury pomiarowej

Układ pomiarowy składa się z lampy Francka - Hertza (nazywana dalej: Lampą F-H) wypełnionej rtęcią i umieszczonej w termostacie, urządzenia kontrolującego napięcia przyłożone do elektrod lampy (Zasilacz), multimetru V 623 (nA) mierzącego płynący przez nią prąd elektryczny i woltomierza cyfrowego V-541 (V) służącego do pomiaru napięcia przyspieszającego. Schemat blokowy aparatury przedstawiono na Rys. 1, natomiast faktyczny jej wygląd prezentuje Rys. 2. Fotografie poszczególnych elementów zestawu załączone są w dalszej części instrukcji.



Rys. 1. Schemat blokowy układu pomiarowego.

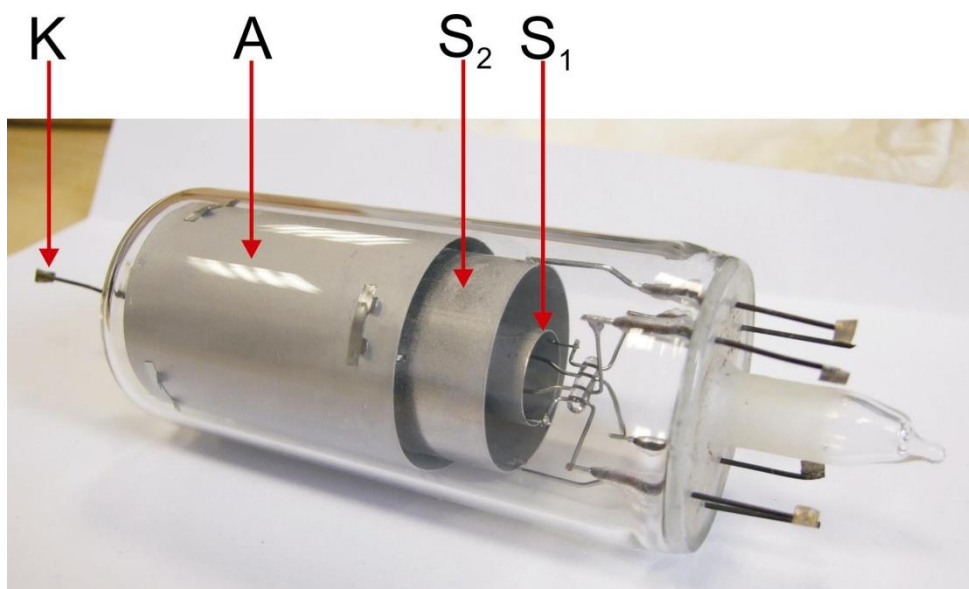


Rys. 2. Wygląd aparatury pomiarowej z zaznaczonymi elementami: V – woltomierz cyfrowy V-541 lub Unitra 1321; B – uziemienie; C – stabilizator temperatury; F-H – lampa Francka - Hertza; nA – multimetr V623; D – bateria 1.5 V; Zasilacz – zasilacz stabilizowany napięcia przyspieszającego i prądu żarzenia katody; μA – mikroamperomierz; A - amperomierz.

2. Wykaz elementów aparatury pomiarowej

a) Lampa Francka – Hertza w termostacie z grzałką.

Lampa, jakiej używa się w doświadczeniu jest to udoskonalona lampa Francka – Hertza, której dokładny opis znajduje się w materiałach uzupełniających. Lampa posiada cztery elektrody: anodę, katodę i dwie siatki umieszczone pomiędzy anodą i katodą.



Rys. 3. Fotografia przedstawiająca lampę F – H z zaznaczonymi poszczególnymi elementami: K – katoda pośrednio żarzona; A – anoda; S_1 – elektroda z siatką 1; S_2 – elektroda z siatką 2.

Lampa F – H zawiera niewielkie ilości rtęci, która stopniowo paruje, kiedy lampa jest grzana wewnątrz układu grzejnego zaznaczonego jako E na Rys. 4. Jest to termostat z wbudowaną grzałką. Utrzymywanie lampy w stałej temperaturze ok. 70°C, powoduje, że ciśnienie par rtęci wewnątrz lampy jest stałe podczas całego eksperymentu. Temperatura pieca jest kontrolowana stabilizatorem pokazanym na: Rys. 5.

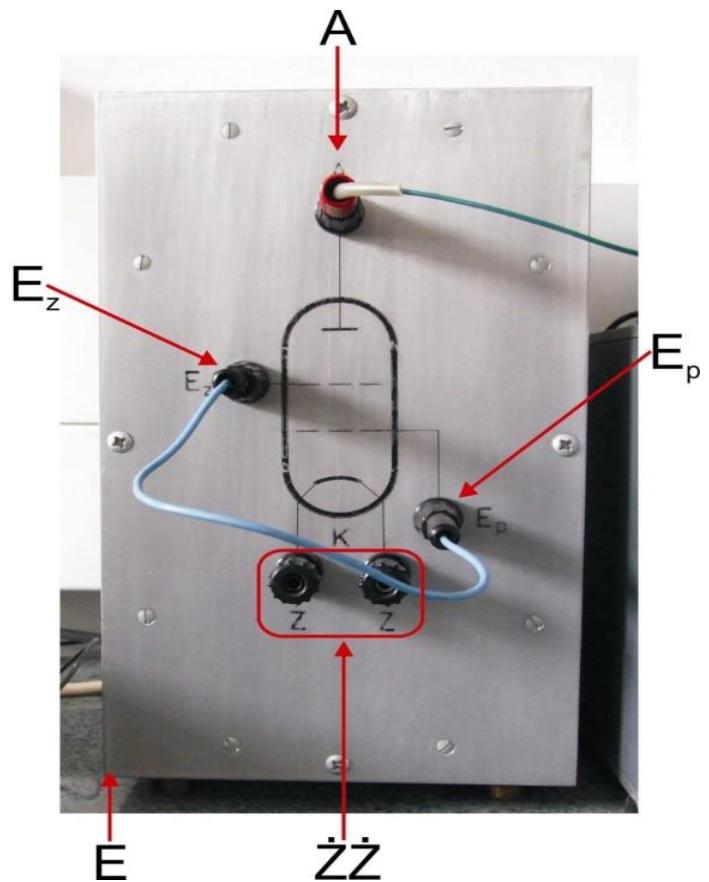
Rys. 4. Termostat z lampą F – H:

A – anoda;

E_z, **E_p** – wejścia siatek lampy **S₁** i **S₂** (patrz Rys. 11), potencjał pomiędzy nimi jest stały

ŻŻ – wejścia do podłączenia zasilacza katody lampy i amperomierza.

E – obudowa układu grzejnego z lampą F-H.



b) Stabilizator temperatury grzałki.

Stabilizator temperatury grzałki utrzymuje stałą temperaturę, ok. 70°C, wewnątrz termostatu z lampą F – H.

Rys. 5. Stabilizator temperatury grzałki termostatu.

Opis oznaczeń stabilizatora:

A – lampka informująca o załączeniu stabilizatora do sieci;

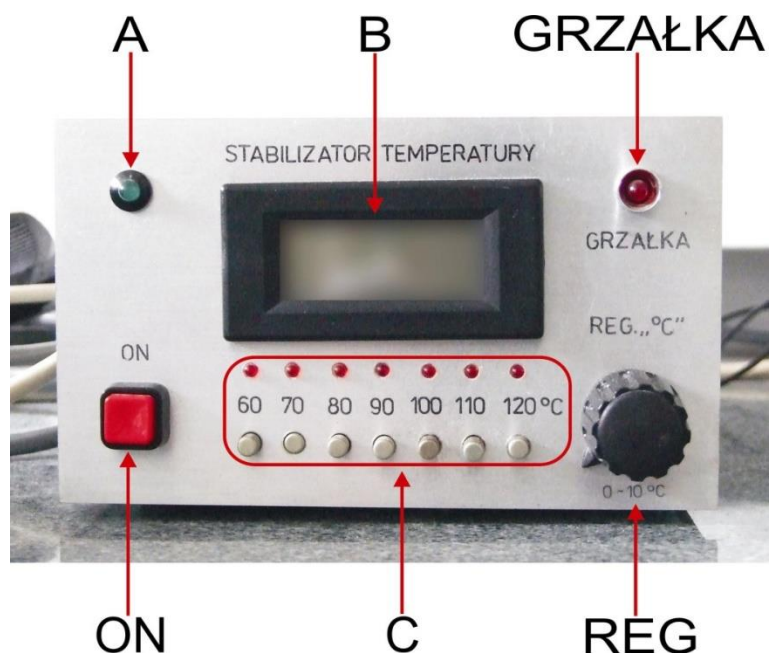
B – wyświetlacz;

GRZAŁKA – lampka informująca o działaniu grzałki;

REG – regulator dokładnej nastawy temperatury do 0.1°C;

C – przełączniki zgrubnej nastawy temperatury;

ON – włącznik urządzenia.

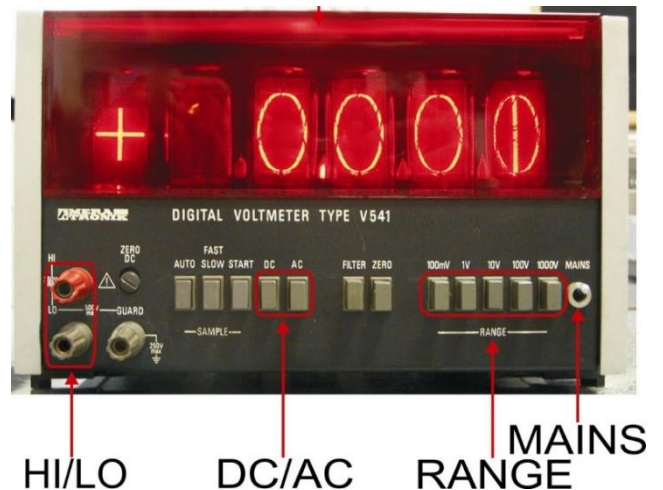


c) Woltomierz cyfrowy V-541 lub Unitra 1321 (używamy jednego z nich).

Woltomierz w tym doświadczeniu służy do pomiaru napięcia przyspieszającego elektrony (U_p).

Woltomierz Unitra 1321 (Rys. 6, lewy panel) na panelu frontowym posiada: przycisk POWER – włącznik (czerwony), gniazda wejściowe (pomiaru dokonujemy na wejściach LO/HI), wyświetlacz cyfrowy, przyciski MODE - przełączniki wyboru modu pracy (wybieramy mod stałego napięcia, V_{DC}), oraz przełączniki zakresu pracy (RANGE) od 0,2 do 200V.

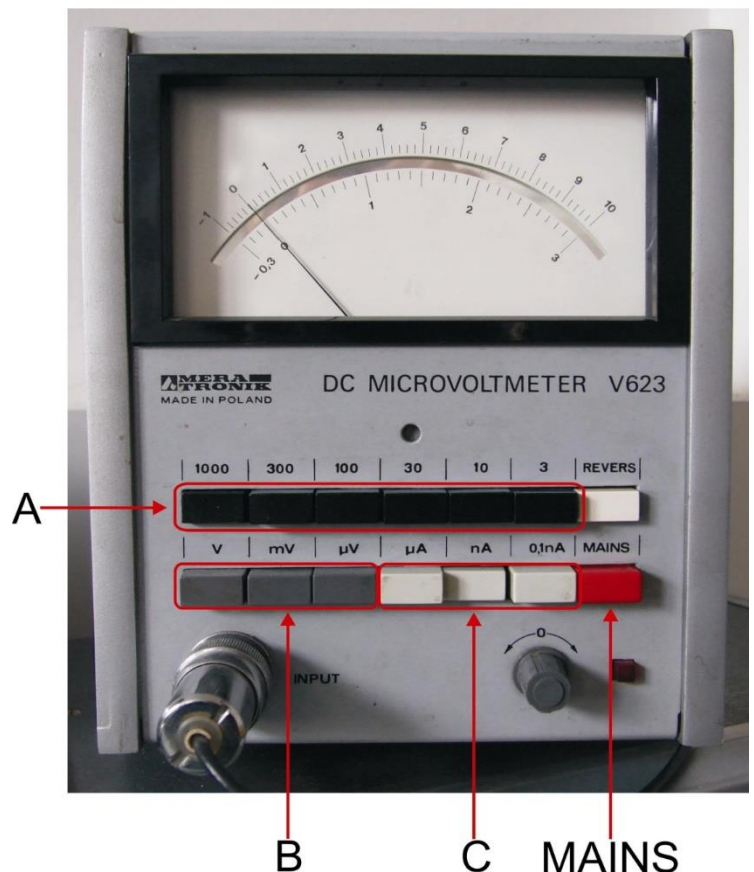
Woltomierz cyfrowy V-541 widoczny jest na Rys. 6, prawy panel, z zaznaczonymi przyciskami i gniazdami: MAINS – włącznik, RANGE – 5 przycisków zmiany zakresu skali pomiarowej: 100 mV, 1 V, 10 V, 100 V, 1000 V; DC/AC – przełączniki trybu pracy; HI/LO – gniazda: „gorące”(HI) i „zimne”(LO).



Rys. 6. Woltomierz cyfrowy Unitra 1321 (po lewej) oraz Woltomierz cyfrowy V-541 (po prawej).

d) Multimetr V623.

Multimetr V623 w tym doświadczeniu służy do pomiaru natężenia prądu kolektora. Jest to miernik napięcia i natężenia prądu stałego wraz ze wzmacniaczem napięcia. Pozwala na pomiar natężenia od 0.3 nA do 1 mA i napięcia w zakresie od 3 μ V do 1000 V (końcowe wartości podzakresów), w zależności od wybranego podzakresu. Widok przedniego panelu z zaznaczonymi przyciskami pokazany jest na Rys. 7.



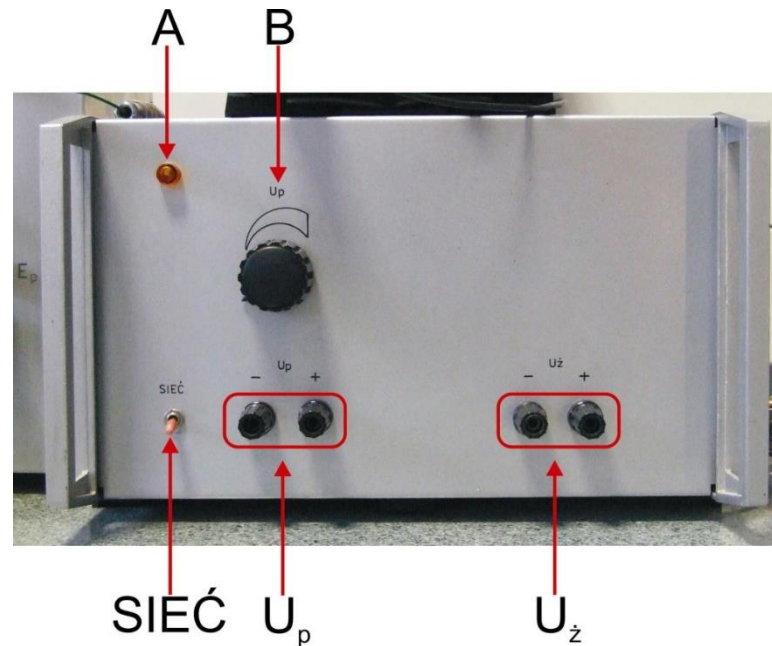
Rys. 7. Multimetr V 623 DC z elementami sterowania:

A – 6 przycisków zakresu skali pomiarowej; B – 3 przyciski zmiany zakresu pomiaru napięcia; C – 3 przyciski zmiany zakresu pomiaru natężenia prądu; MAINS – przycisk włączania/wyłączania multimetru.

e) Zasilacz stabilizowany prądu i napięcia.

Urządzenie to służy do zasilania prądem stałym lampy Francka – Hertza.

UWAGA: Na schemacie blokowym układu pomiarowego, Rys. 1, przyciski wyjściowe napięcia żarzenia lampy zaznaczone zostały po lewej stronie zasilacza (dla uproszczenia schematu) natomiast na zasilaczu, Rys. 8, znajdują się one po prawej stronie.



Rys. 8. Zasilacz stabilizowany prądu i napięcia. A – lampka informująca o załączeniu zasilacza do sieci elektrycznej; B – pokrętko zmiany napięcia przyspieszającego; U_p – zaciski wyjściowe napięcia przyspieszającego; U_z – zaciski wyjściowe prądu żarzenia katody lampy F – H; SIEĆ – włącznik/wyłącznik zasilacza do sieci elektrycznej.

f) Mikroamperomierz.

Mikroamperomierz posiada zakresy prądów: 75, 150, 300, 750, 1500 i 3000 μA ; klasa przyrządu jest dokładność wzorcowania fabrycznego przyrządu. Oznacza to, że dla miernika klasy $k = 0.5$, o zakresie do 3000 A, niepewność względna wynosi:

$$\Delta I = \frac{\text{klasa}(k) \cdot \text{zakres}}{100} = \frac{0.5 \cdot 3000}{100} = 15 \mu\text{A}$$

Ta wartość jest stała dla całego zakresu pomiarowego i stąd zalecenie takiego wyboru zakresu miernika analogowego (wskazówkowego), aby mierzona wartość była większa niż połowa zakresu (wtedy niepewność względna jest mniejsza). Niepewność wynikająca z niedokładności odczytu wartości z miernika, jest równa wartości najmniejszej działki: 50 μA na zakresie 3000 μA .

Rys. 9. Fotografia mikroamperomierza z opisanymi wejściami: A – „+” i C – „-”; B – przełącznik zmiany zakresów pomiaru natężenia prądu.



g) Bateria 1.5 V

Dostarcza napięcia hamującego równego 1.5 V przykładanego pomiędzy siatkę S_2 (E_z) a anodę A lampy F–H.

h) Amperomierz.

Amperomierz służy do pomiaru natężenia prądu żarzenia katody lampy Francka – Hertza. Wartość natężenia prądu nie powinna przekraczać 1 A. Dane techniczne: zakresy mierzonych prądów: 0.75, 1.5 i 3 A; klasa przyrządu: 0.05, zatem niepewność wynikająca z klasy miernika wynosi 0.015A na największym zakresie równym 3 A; niepewność odczytu: 0.04 A na zakresie 3 A.



Rys. 10. Fotografia przedstawiająca amperomierz z opisanymi zaciskami: A – „+” amperomierza; B – zaciski o różnych zakresach natężenia prądu: od lewej: 3, 1.5 i 0.75 A odpowiednio.

V. Wykonanie ćwiczenia

(sposób postępowania, schematy blokowe, uwagi dotyczące obsługi aparatury i BHP)

1. Podłączenie poszczególnych elementów układu pomiarowego przeprowadzić zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 1. Zwrócić szczególną uwagę na przyciski wyjściowe napięcia żarzenia lampy F-H oraz zaciski napięcia przyspieszającego elektrony na schemacie blokowym układu i na zasilaczu napięcia, Rys. 8.

UWAGA! Ćwiczenie może być uruchomione po sprawdzeniu obwodu przez osobę prowadzącą zajęcia lub asystenta technicznego.

2. Włączenie poszczególnych elementów układu pomiarowego

Na początek należy podłączyć wszystkie urządzenia do sieci elektrycznej, a następnie:

a) Włączyć stabilizator temperatury na zakresie 70°C, oznaczony przez C – Rys. 5, wciskając czerwony przycisk **ON**. Zapalą się lampki kontrolne: zielona (sieć) i czerwona (grzałka) **A** i **GRZAŁKA**, odpowiednio. Na wyświetlaczu ciekłokrystalicznym, oznaczonym jako **B**, ukaże się wartość temperatury aktualnie panującej wewnątrz termostatu z lampą elektronową.

- b) Włączyć stabilizowany zasilacz prądu żarzenia katody i napięcia przyspieszającego, przy pokrętle regulacji napięcia U_p – pokrętko **B** (Rys. 8), ustawionym w lewym skrajnym położeniu (do oporu), przełączając włącznik **SIEĆ**. Zapali się żółta lampka zaznaczona jako **A**.
- c) Ustawić woltomierz cyfrowy V-541 na zakres 1000 V – oznaczonym przez **RANGE** na Rys. 6, i włączyć go przełącznikiem **MAINS**. W przypadku użycia woltomierza Unitra 1321 zakres RANGE ustawić na 200V, a przełącznik modu pracy na pomiar napięcia stałego V_{DC} , następnie włączyć przycisk POWER. W trakcie pomiarów zmniejszyć zakres pracy woltomierza.
- d) Włączyć multimetr V623 czerwonym przyciskiem **MAINS** (patrz Rys. 7) na zakresie 1000 nA (wciśnięty jeden z przycisków oznaczony przez **A** w pozycji 1000 i przycisk **C** w pozycji nA). Urządzenie jest przystosowane do pomiaru natężenia prądu.

Należy odczekać ok. 45 min, aby temperatura wewnątrz termostatu osiągnęła 70°C i ustabilizowała się.

3. Przebieg pomiarów

Po wygrzaniu lampy elektronowej można rozpocząć pierwszą serię pomiarów zależności natężenia prądu kolektora I_a od napięcia przyspieszającego U_p . W tym celu należy:

- a) zmierzyć natężenie prądu kolektora w zakresie napięć U_p , od 0 do 13 V. Napięcie należy zmieniać, co 0.05 – 0.1 V. Jedynie w pobliżu maksimum i minimum pomiary powinny być dokładne i napięcie należy zmieniać o ok. 0.02 – 0.04 V. Do zmiany napięcia przyspieszającego U_p służy pokrętko oznaczone jako **B** na Rys. 8. Podczas pomiarów należy pamiętać o odpowiednim doborze zakresów natężeń prądów kolektora na multimetrze V623, Rys. 7. Dla małych napięć przyspieszających zakres pomiaru prądu ustawić na 3nA - służyć do tego przyciski zaznaczone przez **A** na Rys. 7.
 - b) wykonać kilka serii pomiarów w zakresach napięć podanych powyżej. Wszystkie wyniki pomiarów zapisujemy w tabelach. Przykładowa tabela umieszczona jest w dalszej części opracowania (patrz Tabela 1).
4. Wyłączenie aparatury:
- a) Ustawić zakres 1000 nA na multimetrze V623 i wyłączyć go.
 - b) Skręcić pokrętko regulacji napięcia U_p w lewo do oporu i wyłączyć zasilacz.
 - c) Wyłączyć woltomierz cyfrowy.
 - d) Wyłączyć stabilizator temperatury.
 - e) Rozmontować obwód i odłączyć wszystkie urządzenia od sieci elektrycznej.

VI. Opracowanie wyników i raport końcowy

Przykładowe wyniki pomiarów napięcia przyspieszającego w zależności od natężenia prądu kolektora lampy F – H przedstawione są w tabeli poniżej.

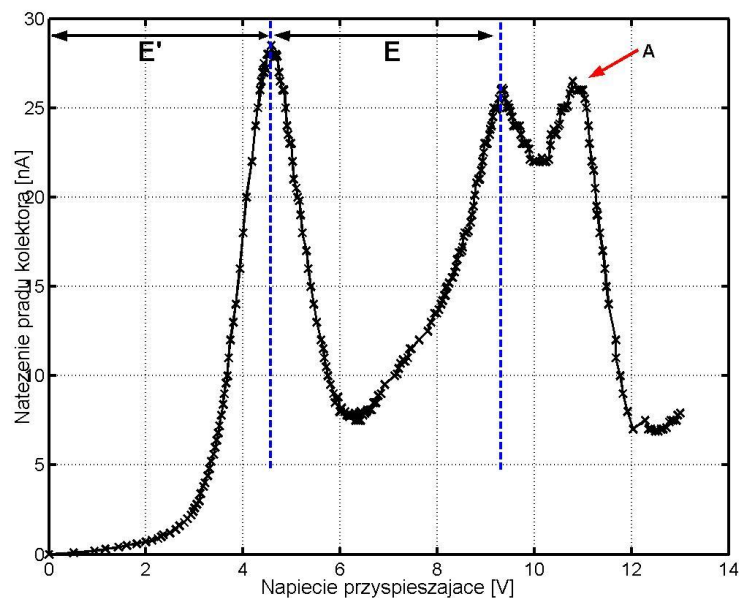
Tabela 1. Pierwsza seria pomiarów.

Nr	U_p [V]	I_a [nA]	Nr	U_p [V]	I_a [nA]
1	0	0	95	9,34	26,1
2	0,51	0,1	96	9,37	26
...	97	9,39	25,5
29	3,39	5,6	98	9,42	25
30	3,42	6	99	9,44	25
31	3,45	6,4	100	9,46	25,2
32	3,48	6,8	101	9,48	25
...

Na podstawie danych z tabeli należy sporządzić wykres zależności $I_a(U_p)$, przykładowy wykres danych eksperymentalnych przedstawiono na Rys. 11. W przypadku kilku serii pomiarowych wykresy należy sporządzić dla każdej serii osobno.

Następnie z wykresów należy odczytać wartości energii pierwszego poziomu wzbudzonego atomu rtęci. Pierwsze (oraz drugie) maksimum znajdujemy w oparciu o punkty tworzące pierwszy (drugie) wierzchołek poprzez wpisanie w te punkty parabol (krzywką lub metodą najmniejszych kwadratów) i odczytanie położenia jej maksimum. Położenie to nie musi pokrywać się z maksymalną wartością natężenia prądu na wykresie. Dla danych z Rys. 11 mamy:

Pierwsze maksimum: 4.58 V, co odpowiada energii 4.58 eV
 Drugie maksimum: 9.34 V, co odpowiada energii 9.34 eV



Rys. 11. Zależność natężenia prądu kolektora od napięcia przyspieszającego dla jednej z serii pomiarów.

Energia pierwszego poziomu wzbudzonego atomu rtęci obliczana jest z różnicy energii maksimumów:

$$E = 9.34 \text{ eV} - 4.58 \text{ eV} = 4.76 \text{ eV}$$

Energia odpowiadająca położeniu pierwszego wierzchołka E' jest niższa od wartości energii poziomu wzbudzonego Hg z powodu kontaktowej różnicy potencjałów pomiędzy anodą a katodą, dlatego odczytujemy różnicę pomiędzy pierwszym a drugim maksimumem.

Analiza uzyskanych wyników i porównanie z danymi literaturowymi.

Na niepewność określenia położenia maksimumów wierzchołków na krzywej $I_a(U_p)$, a tym samym niepewność energii pierwszego poziomu wzbudzonego atomu rtęci wpływa błąd wyznaczenia położenia każdego maksimum krzywej, na który mają wpływ niepewności współczynników wpisanych parabol. Ponadto, należy uwzględnić fluktuacje natężenia prądu oraz błąd odczytu z miernika. Wartość tych niepewności wynoszą odpowiednio $\pm 1.5\%$ i $\pm 0.5\%$ mierzonej wartości natężenia prądu. Wartość ta przekłada się na niepewność pomiaru energii i wynosi $\Delta E = 2\%$.

Ostateczna wartość wraz z niepewnością powinna być postaci:

$$(E \pm \Delta E) \text{ eV},$$

gdzie: E – jest to uśredniona wartość pierwszego poziomu wzbudzonego atomu rtęci uzyskana z kilku serii pomiarowych. Uzyskane wyniki należy porównać z danymi literaturowymi i omówić przyczyny ich ewentualnej niezgodności. W raporcie powinna się także znaleźć dyskusja możliwych przyczyn rozszczepienia drugiego wierzchołka – patrz wierzchołek **A** na Rys. 11.

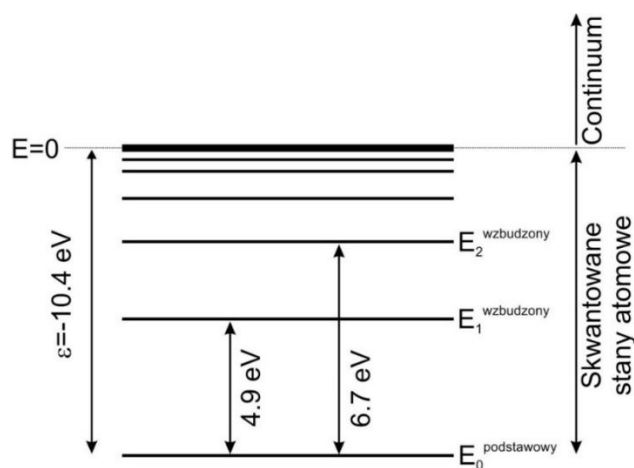
Literatura

- [1] H. Haken, H.C. Wolf, *Atomy i kwanty: wprowadzenie do współczesnej spektroskopii atomowej*, PWN, Warszawa, 2002.
- [2] T. Goworek, *Wstęp do fizyki atomu*, UMCS, Lublin 1987.
- [3] J. Ginter: *Wstęp do fizyki atomu, cząsteczki i ciała stałego*, PWN, Warszawa 1979.
- [4] J. Masalski, *Fizyka dla inżynierów t 2: Fizyka współczesna*, WNT, Warszawa 2002
- [5] J. Franck, G. Hertz, *Verhand Deut. Physik Ges.* 16, 10 (1914)

Appendix: Materiały pomocnicze

Stany wzbudzone i jonizacja atomu.

W roku 1914 Franck i Hertz przeprowadzili doświadczenia dotyczące mechanizmu wzbudzenia atomów rtęci przez wyładowanie w polu elektrycznym [5]. Eksperyment był wykonany w rok po ogłoszeniu postulatów Bohra i stanowił dowód istnienia skwantowanych poziomów energetycznych w atomach. Wzbudzenia atomów pojawiają się, kiedy elektron w stanie podstawowym absorbuje energię i przechodzi do wyższego stanu energetycznego: E_i . Uproszczony diagram poziomów energetycznych atomów rtęci znajduje się na Rys. 12.



Rys. 12. Uproszczony wykres poziomów dla rtęci.

Atomy można wzbudzać dostarczając im energii w zderzeniach z innymi cząsteczkami bądź też elektronami swobodnymi. Jeżeli wzbudzenie następuje w wyniku zderzenia z elektronami, to elektron związany z atomem może przejść energię równą różnicy energii pomiędzy stanem wzbudzonym E_i a podstawowym E_0 . W procesie zderzenia sprężystego elektronów z atomami rtęci elektrony prawie nie tracą energii (z powodu małej masy elektronu w stosunku do masy atomu rtęci), zmieniając jedynie kierunek swej prędkości. Po osiągnięciu jednak dostatecznej energii, podczas zderzenia z atomem rtęci, elektron przekazuje mu część albo całą swoją energię kinetyczną, wzbudzając go na wyższy poziom. Ten rodzaj zderzenia nazywa się zderzeniem niesprężystym. Atom można także zjonizować. Można dostarczyć atomowi Hg energii ϵ , która przeniesie jeden z elektronów ze stanu podstawowego do stanu powyżej $E = 0$ (continuum). Ponieważ elektron o zerowej energii całkowitej nie będzie więcej związany z atomem, więc ϵ jest energią potrzebną do zjonizowania atomu i nazywa się energią jonizacji.

Poziomy energetyczne atomów Hg

W spektroskopii do oznaczenia stanu kwantowego pojedynczego elektronu określonego liczbą kwantową l , czyli orbitalnym momentem pędu elektronu, używa się małych liter.

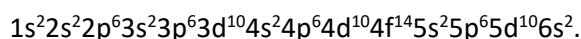
Wartościom:

$l = 0 \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \quad 8 \quad 9 \quad 10,$

odpowiadają oznaczenia:

$s \quad p \quad d \quad f \quad g \quad h \quad j \quad k \quad l \quad m \quad n.$

Przed literą związaną z odpowiednią liczbą kwantową l pisze się wartość głównej liczny kwantowej n . Stan atomu rtęci piszemy następująco:



Z prawej strony u góry litery przedstawiającej liczbę kwantową l zapisana jest liczba elektronów mających tę samą wartość liczb kwantowych n i l . Powyższy zapis oznacza więc, że 2 elektrony atomu są w stanie $n=1, l=0$ ($1s^2$), 2 w stanie $n=2, l=0$ ($2s^2$), 6 w stanie $n=2, l=1$ ($2p^6$), itd.

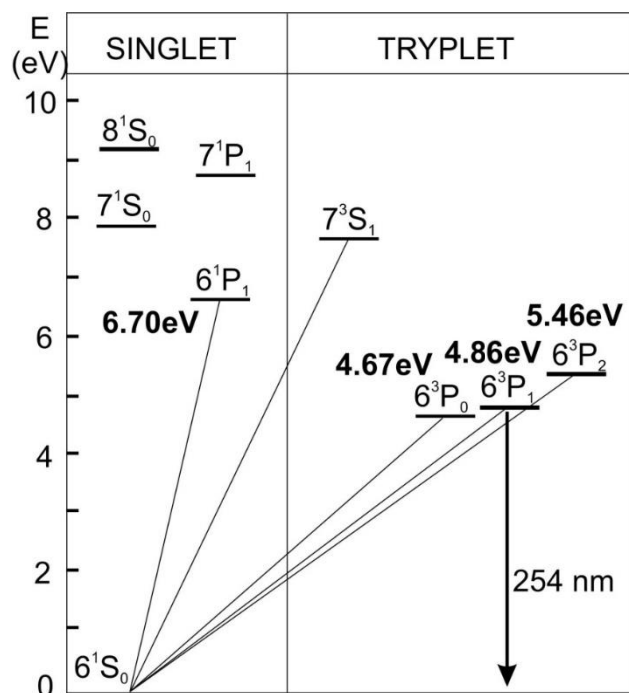
Do oznaczania wartości momentu pędu dla całego atomu używa się dużych liter według następującej umowy. Wartościom:

$L = 0 \quad 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \quad 8 \quad 9 \quad 10$

odpowiadają oznaczenia:

$S \quad P \quad D \quad F \quad G \quad H \quad J \quad K \quad L \quad M \quad N.$

Stany atomu o tych samych wartościach liczb kwantowych L i S , lecz o różnych J , różnią się energią; są to tzw. stany multipletowe. Dla odróżnienia poszczególnych multipletów zapisuje się liczbę kwantową wypadkowego momentu pędu po prawej stronie u dołu litery oznaczającej dany stan i odpowiadającej wartości liczby L , a liczbę możliwych wartości J zapisujemy u góry z lewej strony litery określającej wartość L . Zatem pełna postać oznaczenia stanów energetycznych w atomach ma postać: $n^{2S+1}L_J$, gdzie n jest to główna liczba kwantowa elektronu. Zatem stan podstawowy rtęci możemy zapisać jako: 1S_0 . Poziomy energetyczne atomów rtęci pokazane są na Rys. 13.



Rys. 13. Poziomy energetyczne atomów rtęci.

Kolejnymi poziomami rtęci są stany trypletowe: 3P_0 , 3P_1 i 3P_2 i wyższy stan singletowy 1P_1 . Jednak w doświadczeniu Francka – Hertza obserwuje się tylko wzbudzenie do stanu 3P_1 . (zarówno w widmie emisyjnym, jak i absorpcyjnym atomów rtęci obserwuje promieniowanie o długości fali równej 2537 \AA co odpowiada energii: $\Delta E = 4.86 \text{ eV}$.) Wzbudzony atom może wrócić do stanu podstawowego poprzez emisję fotonu a jest to bardzo szybki proces rzędu 10^{-8} s . Szybka deekscytacja powoduje, że atom ponownie jest w stanie absorbować energię poprzez zderzenia z elektronami. Z wielkiej liczby możliwych przejść między poszczególnymi stanami energetycznymi atomu, obserwowane są tylko nieliczne przejścia odpowiadające określonej zmianie liczb kwantowych. Prawa ujmujące te zmiany nazywamy regułami wyboru. W przypadku atomu rtęci musi być zachowany całkowity moment pędu atomu J , który musi się zmieniać o $\Delta J = \pm 1$. Ta reguła zachowana jest tylko dla stanów: 3P_1 i 1P_1 . Pozostałe dwa stany są metastabilne, tzn. że powrót do stanu podstawowego wymaga więcej czasu, rzędu 10^{-3} s . W przypadku rtęci są to stany o energii wzbudzenia 4.67 i 5.46 eV.