

## Ćwiczenie 522

### Doświadczenie Francka-Hertza

*Przed zapoznaniem się z instrukcją i przystąpieniem do wykonywania ćwiczenia należy opanować następujący materiał teoretyczny:*

1. Model Bohra atomów wodoropodobnych; powstawanie widm emisyjnych i absorpcyjnych pierwiastków, [1] lub [2] lub [3].
2. Doświadczenie Francka-Hertza, [1] lub [3].

#### Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z klasycznym eksperymentem Francka-Hertza i wyznaczenie energii wzbudzenia odpowiadającej przejściu elektronów walencyjnych w atomie rtęci z poziomu podstawowego na pierwszy poziom wzbudzony.

#### Opis zjawiska

Zgodnie z modelem Bohra atomów wodoropodobnych aby elektron w atomie przeszedł ze stanu podstawowego o energii  $E_1$  na najbliższy poziom wzbudzony o energii  $E_2$  musi zostać mu dostarczona energia równa dokładnie

$$\Delta E = E_2 - E_1. \quad (1)$$

Energia ta może zostać dostarczona na wiele sposobów, np. w postaci kwantu światła o częstotliwości  $\nu$  spełniającej zależność

$$h\nu = E_2 - E_1. \quad (2)$$

Innym sposobem jest ogrzanie gazu do wysokiej temperatury. Energia cieplna podczas zderzeń będzie zamieniana na energię wzbudzenia. Ten sposób wymaga jednak bardzo wysokich temperatur. Znacznie prostszym sposobem jest przyspieszenie wiązki elektronów w polu elektrycznym i spowodowanie ich zderzeń z atomami gazu. Jeśli energia elektronów w wiązce będzie mniejsza od energii potrzebnej do wzbudzenia walencyjnych elektronów atomów gazu na poziom wzbudzony wtedy podczas zderzeń przyspieszonych elektronów z atomami gazu elektrony te nie zmieniają praktycznie energii kinetycznej. Dzieje się tak z powodu znacznej dysproporcji mas elektronu i atomów gazu. Zderzenie wygląda podobnie jak zderzenie ze ścianą po którym elektrony mogą zmienić kierunek ale ich energia kinetyczna pozostaje niezmienną. Mówimy wtedy o sprężystych zderzeniach elektronów z atomem. Kiedy jednak energia elektronu w wiązce jest równa albo większa od energii potrzebnej do wzbudzenia, tj. gdy

$$E_{\text{kin}} \geq E_2 - E_1,$$

to rozpędzony elektron może podczas zderzenia przekazać elektronowi walencyjnemu energię dokładnie równą różnicy energii między poziomem podstawowym a wzbudzonym. Jeśli energia elektronu w wiązce jest większa od energii wzbudzenia wtedy elektronowi po zderzeniu pozostaje część jego energii podstawowej. W tym przypadku mówimy o niesprężystym zderzeniu elektronu z atomem gazu. Elektron atomu, który przeszedł na poziom wzbudzony po krótkim czasie (rzędu  $10^{-8}$  sekundy), powróci na swój stan podstawowy emitując kwant światła (niekoniecznie widzialnego) zgodnie ze wzorem (2).

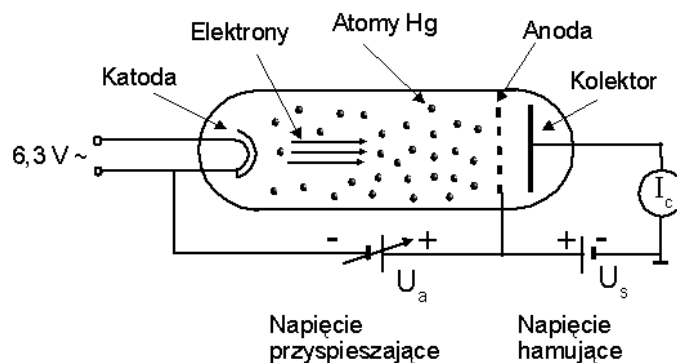
Franck i Hertz wykorzystali taki właśnie sposób wzbudzania w swoim klasycznym eksperymencie. Dzięki temu mogli wyznaczyć energię potrzebną do przejścia elektronów walencyjnych ze stanu podstawowego do stanu wzbudzonego w gazie złożonym z atomów rtęci potwierdzając jednocześnie słuszność modelu Bohra.

#### Metoda pomiaru

Doświadczenie Francka-Hertza przeprowadza się przy pomocy specjalnie skonstruowanego układu. Jego najważniejszym elementem jest lampa szklana zawierająca niewielką ilość rtęci, która po podgrzaniu zamienia się w parę. Lampa zawiera także katodę, która emituje elektrony na skutek termoemisji, perforowaną anodę, której potencjał jest dodatni względem katody oraz kolektor, którego potencjał jest ujemny względem anody. Tak więc różnica potencjałów między katodą a anodą przyspiesza elektrony, które po przejściu przez perforowaną anodę są nieznacznie hamowane na skutek odwrotnie przyłożonej różnicy potencjałów między anodą i kolektorem. Odległości katoda-anoda oraz anoda-kolektor są tak dobrane, aby odległość katoda-anoda była znacznie większa zaś odległość anoda-kolektor znacznie mniejsza od średniej drogi swobodnej elektronów. Dzięki temu jest praktycznie niemożliwe aby elektron wyemitowany z katody dotarł do anody bez zderzenia z atomami gazu (w rzeczywistości zderza się wielokrotnie) i jest mało prawdopodobne by elektrony zderzały się z atomami gazu pomiędzy anodą i kolektorem.

Atom rtęci ma 80 elektronów ale tylko dwa z nich (walencyjne) można stosunkowo łatwo wzbudzić na wyższy poziom energetyczny. Wyobraźmy sobie, że pomiędzy katodą i anodą przyłożono niewielkie napięcie przyspieszające takie, że energia jaką zyskują w tym polu elektrony  $eU_a$  jest mniejsza od energii wzbudzenia atomów rtęci:

$$eU_a < E_2 - E_1. \quad (3)$$



Rys. 1. Schemat ideowy układu doświadczenia Francka-Hertza

W taki przypadku zderzenia elektronów z atomami rtęci są sprężyste. Podczas każdego zderzenia elektrony zmieniają tylko kierunek ruchu i w końcu przelatują przez perforowaną anodę, przebywają obszar napięcia hamującego i docierają do kolektora. Miernik rejestruje prąd płynący w obwodzie kolektora. Prąd ten zwiększa się wraz ze zwiększaniem się napięcia przyspieszającego. Kiedy napięcie przyspieszające osiąga wartość taką, że energia przyspieszanych elektronów jest równa albo nieznacznie większa od energii wzbudzenia wtedy zderzenia z atomami stają się niesprężyste. Elektron oddaje energię równą energii wzbudzenia elektronowi walencyjnemu atomu i ten przechodzi na poziom wzbudzony. Elektron, który spowodował przejście ma teraz znikomą energię kinetyczną niewystarczającą do pokonania hamującego napięcia między anodą i kolektorem. Obserwujemy gwałtowny spadek prądu kolektora.

Gdy nadal zwiększamy napięcie przyspieszające wtedy elektron, który oddał część swojej energii atomowi rtęci ma jeszcze szansę na ponowne przyspieszenie przed dotarciem do anody i uzyskanie energii potrzebnej do pokonania napięcia hamującego. Natężenie prądu kolektora znowu rośnie. Kiedy napięcie przyspieszające staje się na tyle duże, że

$$eU_a = 2 (E_2 - E_1), \quad (4)$$

wtedy elektron po pierwszym zderzeniu niesprężystym i oddaniu energii atomowi rtęci ma szansę ponownie przyspieszyć tak, że jego energia kinetyczna będzie wystarczająca do wzbudzenia kolejnego atomu na swojej drodze. Po drugim zderzeniu niesprężystym jego energia będzie niewystarczająca jednak aby przebyć napięcie hamujące i ponownie obserwujemy spadek prądu kolektora.

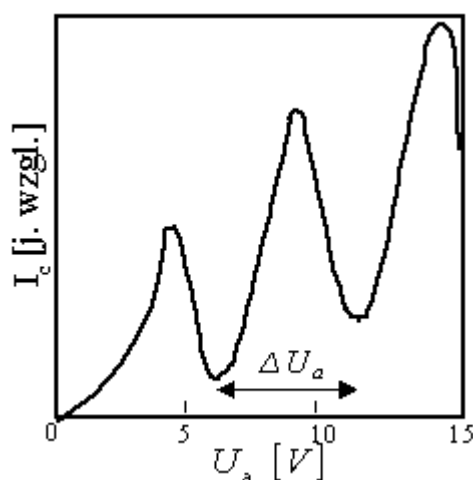
Podobny spadek będziemy obserwować dla każdego napięcia przyspieszającego spełniającego zależność

$$eU_a = n (E_2 - E_1) \quad \text{gdzie } n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

Zależność prądu kolektora od napięcia przyspieszającego ma kształt przedstawiony na rysunku 2. Odległość między kolejnymi minimami określa energię wzbudzenia

$$E_2 - E_1 = e\Delta U_a \quad (6)$$

Warto zwrócić uwagę, że w rzeczywistym eksperymencie położenie pierwszego minimum przypada dla większego napięcia przyspieszającego niż wynosi odległość pomiędzy minimami.



Rys. 2. Natężenie prądu kolektora w funkcji napięcia przyspieszającego

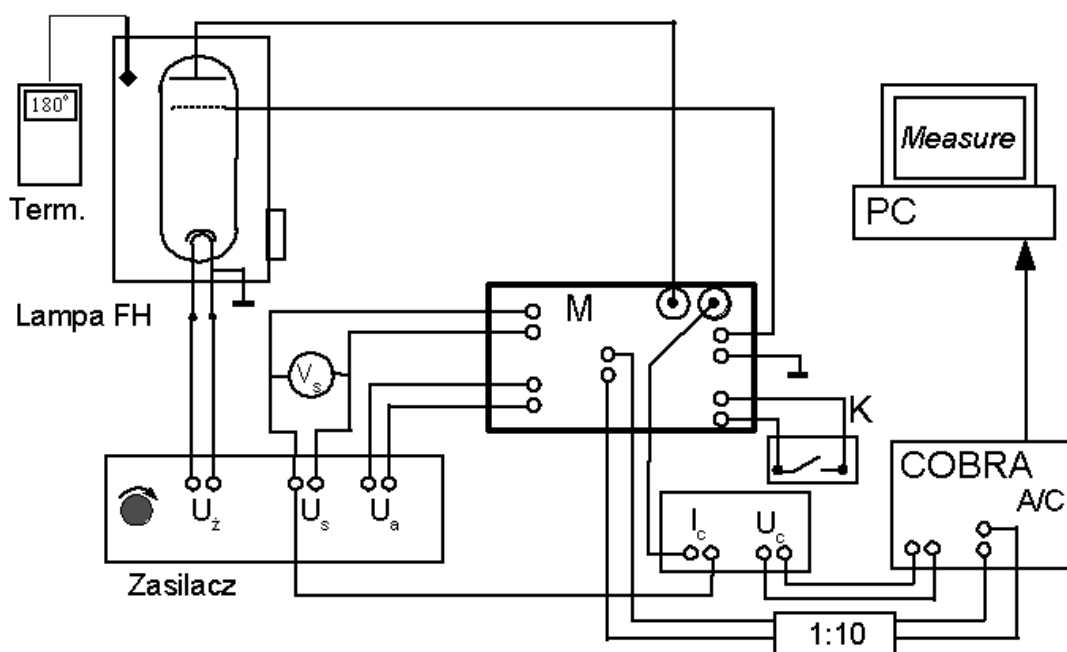
## Opis układu pomiarowego

Praktyczny układ wykorzystywany w doświadczeniu przedstawiony jest na rysunku 3. Lampa z rtęcią umieszczona jest w termostатовanej obudowie z grzejnikiem. Temperatura wewnątrz obudowy mierzona jest przy pomocy termometru elektronicznego. Zasilacz ma trzy wyjścia dostarczając napięcia żarzenia katody  $U_z$ , napięcia przyspieszającego  $U_a$  i napięcia hamującego  $U_s$ . Wartość napięcia hamującego odczytać można na mierniku  $V_s$ .

Aby zapewnić stopniowy wzrost napięcia przyspieszającego podczas przeprowadzania pomiarów pomiędzy zasilaczem a anodą bańki umieszczono specjalny moduł M. Dzięki zawartemu w nim układowi RC napięcie na anodzie rośnie eksponencjalnie po otwarciu klucza K (przy zamkniętym kluczu K napięcie przyspieszające jest zero).

Podczas pomiarów musimy mierzyć prąd kolektora  $I_c$  oraz napięcie przyspieszające  $U_a$ . Ponieważ prąd kolektora jest bardzo mały, w układzie zastosowano wzmacniacz, który zamienia natężenie prądu kolektora na napięcie  $U_c$ . Ponieważ do ustalenia położenia minimów na wykresie 2 nie jest konieczna znajomość dokładnej wartości prądu  $I_c$  możemy dalej operować wartością  $U_c$ , która jest do tego prądu proporcjonalna.

Oba sygnały czyli  $U_c$  i  $U_a$  podawane są na wejścia odpowiednio (1) i (2) przetwornika analogowo-cyfrowego COBRA. Z przyczyn czysto technicznych amplituda sygnału  $U_a$  jest dziesięciokrotnie zmniejszona. (Należy pamiętać o tym podczas odczytywania wskazań komputera podczas pomiarów.) Sygnał z przetwornika COBRA doprowadzony jest do komputera PC. Dzięki programowi "Measure" możliwe jest automatyczne sczytywanie danych pomiarowych i ich dalsza obróbka.



Rys. 3. Układ wykorzystywany w ćwiczeniu

## Kolejność czynności

### Przygotowanie układu

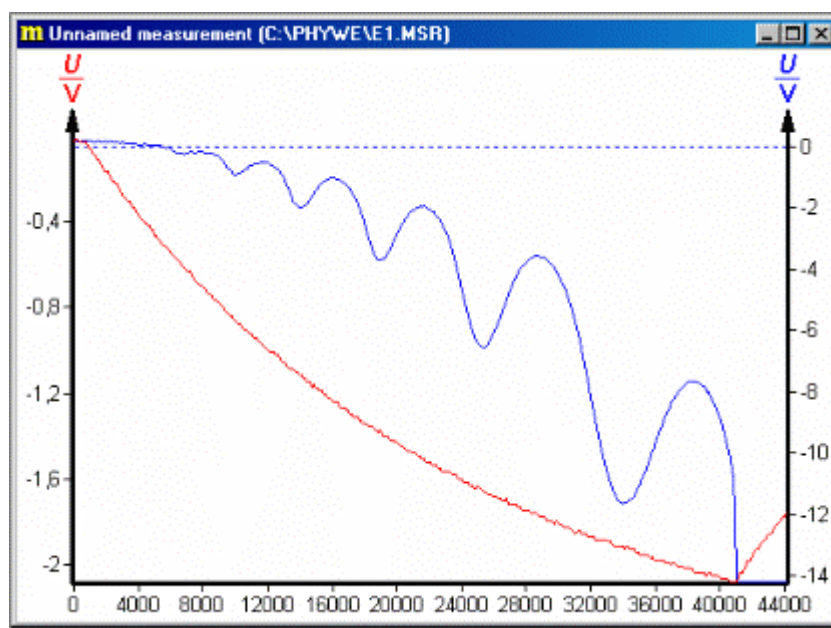
1. Zapoznać się z układem i zidentyfikować wszystkie elementy opisane w instrukcji.  
*Nie wolno niczego rozłączać ani nie łączyć samodzielnie. Na dalsze czynności trzeba bezwzględnie uzyskać zezwolenie od prowadzącego.*
2. Zamknąć klucz K.
3. Włączyć zasilacz napięć  $U_a$ ,  $U_z$  i  $U_s$ . Przy pomocy pokrętła ustawić napięcie hamujące  $U_s = 1,5$  V (wartość tego napięcia pokazuje miernik cyfrowy  $V_s$ ).
4. Włączyć wzmacniacz prądu  $I_c$ .
5. Włączyć komputer i uruchomić program „Measure” (menu {Start} → {Phywe} → {Measure}).
6. Włączyć termostat (włącznikiem na kablu) i ustawić pokrętłem temperaturę  $160^\circ\text{C}$ . Poczekać na ustalenie temperatury (około 15 minut). Obserwować wskazania termometru cyfrowego aby nie dopuścić do przekroczenia wartości  $210^\circ\text{C}$ . Po osiągnięciu odpowiedniej temperatury układ jest gotowy do wykonania eksperymentu.
7. Zbieranie danych wspomagane będzie przez program „Measure”. W tym celu z menu {File} należy wybrać {New measurement}.
8. Poprosić prowadzącego o sprawdzenie ustawień początkowych widocznych na ekranie.

9. **Przed przystąpieniem do kolejnych czynności przeczytać poniższe uwagi:**

Pomiar wykonujemy otwierając klucz K i jednocześnie klikając na ekranie przycisk {start measurement}. W tym momencie napięcie przyspieszające zaczyna narastać eksponencjalnie. Jego wartość widoczna jest na lewym wskaźniku cyfrowym (Analog 1) albo wykresie (w zależności od tego, co zostało wybrane przez prowadzącego). Wartość wskazywana jest 10 razy mniejsza od rzeczywistej. Nie należy dopuszczać do przekroczenia wartości 3 V (co odpowiada rzeczywistym 30 V). Napięcie  $U_c$  widoczne na prawym wskaźniku (Analog 2) lub na wykresie powinno w trakcie eksperymentu rosnąć i maleć na przemian podobnie jak prąd  $I_c$  (rys. 2), do którego jest ono proporcjonalne. Podczas tego procesu nie wolno dopuścić do wyładowania jarzeniowego w bańce. Należy więc też obserwować lampę FH i w przypadku zauważenia świecenia natychmiast zamknąć klucz K.

**Przeprowadzanie pomiaru**

1. Otworzyć klucz K i kliknąć przycisk {Start measurement}. Kiedy napięcie  $U_a$  osiągnie wartość 3V (albo w innych przypadkach opisywanych powyżej, w których trzeba wyłączyć napięcie) zamknąć klucz i kliknąć przycisk {Stop measurement}. Zbieranie wyników zostało zakończone.
2. Zmienić temperaturę lampy zgodnie ze wskazówkami prowadzącego.
3. Czekając na ponowne ustabilizowanie temperatury opracować wyniki zgodnie ze wskazówkami przedstawionymi w części dotyczącej opracowywania wyników. Można też zachować wyniki na dysku i opracować wszystkie na końcu zajęć. Odpowiedni sposób postępowania ustalić z prowadzącym.
4. Wykonać pomiary dla innych temperatur (180 °C, 200 °C)
5. Po wykonaniu ćwiczenia wyłączyć napięcia w układzie w kolejności odwrotnej niż podczas włączania.
6. **Nie wyłączać komputera.**
7. **Nie rozłączać połączeń w układzie.**

**Analiza wyników przy pomocy programu Measure**Rys. 4. Widok ekranu z wykresem napięć  $U_s$  i  $U_c$  w funkcji czasu

W wyniku każdego doświadczenia otrzymujemy na ekranie dwie krzywe (rys. 4). Pierwsza przedstawia zależność napięcia przyspieszającego od czasu. Druga przedstawia zależność prądu kolektora (a dokładniej proporcjonalnego do niego napięcia  $U_c$ ) od czasu. Z tych krzywych można już odczytać różnice napięć przyspieszających odpowiadających kolejnym minimom prądu kolektora (jak?). Wygodniej jest jednak przedstawić dane na jednym wykresie  $U_c = f(U_a)$  po wyeliminowaniu czasu. Funkcje programu "Measure" ułatwiają to zadanie.

1. Po pierwsze należy wygładzić krzywą zależności napięcia  $U_c$  od czasu. Dokonujemy tego wykorzystując funkcję {Analysis} → {smooth} (Należy pamiętać o ustawieniu parametrów „right axis” oraz „overwrite”. Stosowanie parametru overwrite zapewnia, że wygładzona krzywa zastąpi oryginalną). Zastosowanie funkcji {smooth} do obu krzywych często doprowadza paradoksalnie do otrzymania poszarpanej krzywej wynikowej  $U_c = f(U_a)$ .
2. Z przyczyn technicznych wykresy na ekranie są odwrócone do góry nogami a skala napięcia przyspieszającego jest podzielona przez 10. Aby doprowadzić wykresy do prawidłowej postaci należy wykorzystać funkcję {Analysis} → {Channel modification}

3. Oś napięcia przyspieszającego mnożymy przez  $-10$  (tj. wpisujemy  $-10 * x$ ) i pamiętamy o opcji “overwrite”
4. Oś prądu (napięcia) kolektora odwracamy (tj. wpisujemy  $-x$ ) pamiętamy o opcji “overwrite”
5. Teraz możemy przekształcić dwa wykresy do postaci jednego wykresu  $U_c = f(U_a)$ . Wykorzystujemy do tego funkcję {Measurement}  $\rightarrow$  {Channel manager}.
6. Przy pomocy funkcji {Information} (kliknąć odpowiednią ikonkę) można dopisać dodatkowe dane dotyczące wykresu oraz po swojemu opisać oś wykresu.
7. Zapisać wyniki obróbki danych w nowym zbiorze i ewentualnie wydrukować wykres.
8. Program Measure pozwala także na automatyczne znalezienie położenia ekstremów funkcji  $U_c=f(U_a)$ . Wykorzystujemy do tego funkcję programu {Analysis}  $\rightarrow$  {Curve analysis}. Otrzymane wyniki możemy po skopiowaniu umieścić w innej aplikacji typu arkusz kalkulacyjny.

### Opracowanie sprawozdania

1. Z wykresów uzyskanych podczas doświadczenia odczytać napięcia odpowiadające minimom prądu kolektora i zestawić w tabelkach.
2. Obliczyć energie wzbudzenia (wyrażone w [eV]) dla każdej z par sąsiadujących minimów.
3. Obliczyć wartości średnie energii wzbudzenia dla poszczególnych temperatur.
4. Przeprowadzić analizę niepewności pomiarowej wyznaczonych wartości energii wzbudzenia.
5. Wyliczyć długość fali świetlnej odpowiadającej przejściu na poziom wzbudzony.
6. Przedyskutować otrzymane wyniki i przebieg eksperymentu.

### Literatura

- [1] V. Acosta, C. L. Cowan, B. J. Graham, „Podstawy fizyki współczesnej”, (rozdział IV), PWN, Warszawa, 1981.
- [2] R. Resnick, D. Halliday, *Fizyka*, t. II, PWN, Warszawa, 1998.
- [3] I. W. Sawieliew, *Wykłady z fizyki*, t. 3, PWN, Warszawa, 2002.