

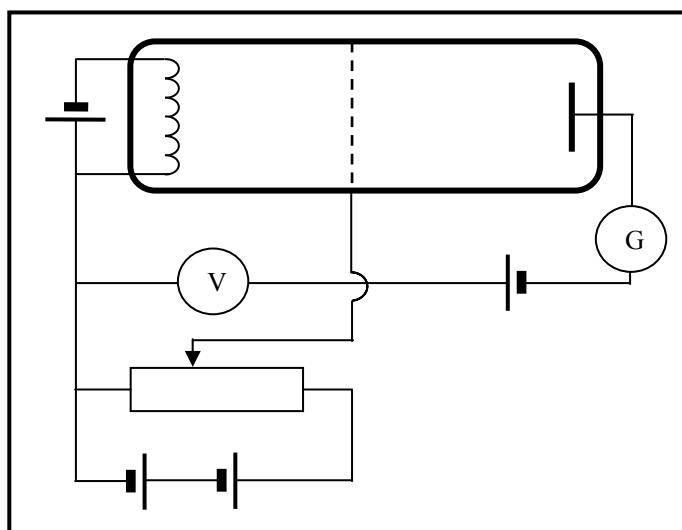
Doświadczenie Francka-Hertza na przykładzie atomów neonu.

Celem ćwiczenia jest wykonanie doświadczenia Francka-Hertza dla lampy wypełnionej neonem. Wielkością mierzoną jest wartość prądu płynącego w obwodzie anody lampy elektronowej w funkcji napięcia przyspieszającego elektrony.

Zagadnienia: ruch ładunku w polu elektrycznym, pole zachowawcze, stany elektronowe atomu, absorpcja i emisja promieniowania, teoria kinetyczna gazów.

Przyrządy: lampa neonowa z zasilaczem i panelem sterującym, komputer ze zintegrowaną kartą kontrolno-pomiarową i oprogramowaniem.

Wprowadzenie



Rys. 1. Schemat oryginalnego doświadczenia Francka-Hertza.

Zastosowana lampa elektronowa w wersji bez siatki zachowywałaby się jak zwykła dioda. Siatka ma potencjał wyższy zarówno od katody (duża różnica) jak i od anody (niewielka różnica). Napięcie pomiędzy katodą i siatką przyspiesza elektrony do znacznych prędkości. Napięcie między siatką i anodą ma za zadanie zatrzymanie na siatce tych elektronów, które w jej pobliżu miały niewielką prędkość. Jeśli w bańce panuje próżnia, lampa z siatką nadal zachowuje się jak dioda, z tą różnicą, że jej przewodność regulowana jest przez potencjał siatki – im większy potencjał siatka-katoda, tym większy prąd płynie przez anodę. Napełnienie bańki gazem spowoduje możliwość oddziaływania elektronów z jego atomami. Jeśli stężenie gazu jest bardzo duże, elektrony nieustannie zderzają się z jego atomami, powodując wzrost temperatury gazu, a natężenie prądu płynącego przez lampę jest małe. Obniżenie stężenia (ciśnienia) gazu powoduje wydłużenie drogi swobodnej elektronów i wzrost natężenia prądu anodowego. Elektrony rozpędzone pomiędzy katodą i siatką dość swobodnie pokonują potencjał hamujący za siatką i docierają do anody. Na drodze od katody do siatki doznają kilku zderzeń, ale na skutek ogromnej różnicy mas ($m_e \ll m_{at}$) i prędkości ($V_e \gg V_{at}$) elektrony praktycznie nie wymieniają energii kinetycznej z atomami. Ruch ten można porównać do spadania „deszczu” kuleczek kauczukowych w polu grawitacyjnym w otoczeniu rozrzuconych przypadkowo, niemal nieruchomych kilkusetkilogramowych głazów. Pomimo wielu zderzeń, dzięki zachowawczemu charakterowi pola (grawitacyjnego w tym wypadku, a elektrycznego w lampie) prędkość kulek zdefiniowana jest jednoznacznie wysokością ich położenia, bez względu na dotychczasowy tor ruchu.

Jeśli napięcie przyspieszające osiągnie wartość U_g taką, że iloczyn $U_g e$ zrówna się z różnicą poziomów energetycznych atomów gazu, to zaobserwujemy ciekawe zjawisko: atomy pochłoną energię kinetyczną elektronów przechodząc do stanu wzbudzonego, a elektrony zostaną zatrzymane. Ponieważ absorpcja taka jest zjawiskiem rezonansowym, nastąpi selekcja elektronów ze względu na ich energię. Zjawisko wzbudzania zacznie się przy napięciu granicznym U_g w okolicy siatki i będzie zachodziło dla wszystkich napięć wyższych od U_g . W przypadku niektórych substancji, można ten efekt zobaczyć, ponieważ wzbudzeniu zawsze towarzyszy emisja, choć nie zawsze w widzialnym zakresie widma. Ustawienie dodatniego potencjału siatki względem anody powoduje, że dla napięcia przyspieszającego o wartości bliskiej U_g wzbudzenie i towarzyszące mu wyhamowanie elektronów następuje w najbliższej okolicy siatki, przez co elektrony te zostają przez nią wyłapane. Przejawia się to w wyraźnym spadku prądu anody, ponieważ dociera tam mniej elektronów. Dalszy wzrost napięcia przyspieszającego powoduje przesunięcie linii, na której następuje wzbudzenie atomów (i wyhamowanie elektronów) w stronę katody. Pomocne do zrozumienia tego zjawiska jest uświadomienie sobie, że pole elektryczne jest zachowawcze, czyli prędkość elektronu (a tym samym jego energia kinetyczna) jest funkcją jedynie odległości od katody, a nie drogi, jaką elektron przebył. Odsunięcie linii wzbudzenia od siatki (widoczne gołym okiem, jeśli emisja następuje w świetle widzialnym) daje elektronom szansę na rozpędzenie się i minięcie siatki. W ten sposób prąd anodowy może dalej płynąć, coraz mniej zakłócany przez akty absorpcji. W momencie, gdy napięcie przyspieszające osiąga wartość $2U_g$, pojawia się w okolicy siatki druga linia wzbudzenia (również widoczna przy widzialnej emisji) i ponownie zostają wyłapywane wyhamowane elektrony. Prąd anodowy znów się zmniejsza i sytuacja powtarza się cyklicznie w miarę wzrostu napięcia przyspieszającego. Szczególnie efektowna jest lampa neonowa, gdzie można gołym okiem zaobserwować kilka pasm wzbudzenia w kolorze czerwonym.

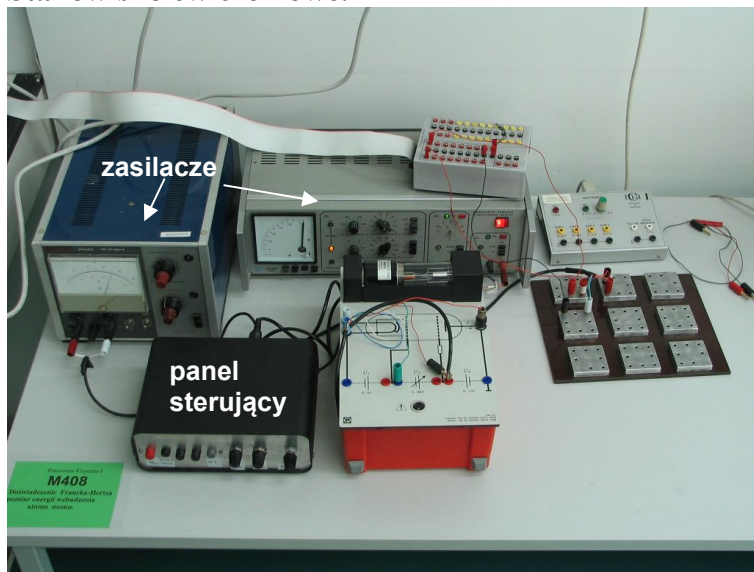
Z opisu tego wynika, że kwantowy charakter wzbudzenia będzie tym lepiej widać, im bardziej jednorodny jest pole w obrębie przyspieszania elektronów. Dlatego często buduje się lampy z dodatkową siatką umieszczoną zaraz za katodą, aby nieregularny zazwyczaj kształt katody nie zakłócał jednorodności pola elektrycznego. Przyspieszanie następuje wtedy pomiędzy siatkami.

Przy interpretacji wyników (położenie minimów na wykresie $I(U)$) należy zwrócić uwagę na to, że pierwsze minimum jest przesunięte w prawo o potencjał hamujący siatki i być może w niewielkim stopniu (w zależności od konstrukcji lampy) o pracę wyjścia elektronów z materiału katody. Różnica położenia pomiędzy kolejnymi minimami powinna dać wynik obciążony stosunkowo najmniejszym błędem.

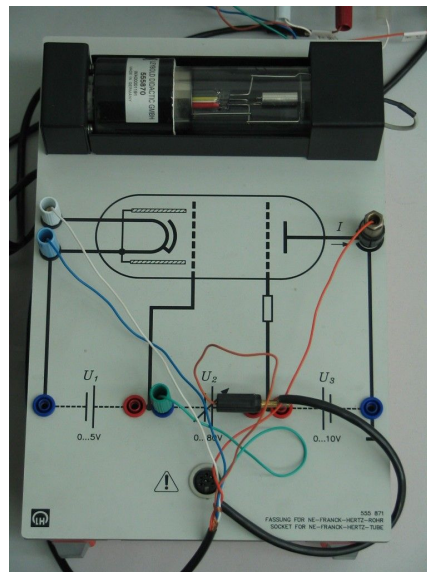
Alternatywny układ pomiarowy mógłby zamiast prądu anodowego mierzyć prąd siatki. Wtedy w miejsce minimów pojawiłyby się wyraźne maksima, a poza nimi prąd siatki miałby wartość znikomą.

Należy na koniec przypomnieć, że doświadczenie to, zrealizowane przez Jamesa Francka i Gustawa Hertza w 1914 r., miało na celu właśnie sprawdzenie hipotezy Bohra o kwantowym charakterze zjawisk absorpcji i emisji energii przez atomy. Zostało bardzo przemyślnie zaprojektowane w taki sposób, by pomimo niewidzialnej emisji atomów rtęci, której pary stanowiły ośrodek oddziałujący z elektronami w lampie, uzyskać jednoznaczny dowód na dyskretny charakter zjawiska absorpcji energii przez atomy. Franck i Hertz otrzymali za nie nagrodę Nobla w 1925 r.

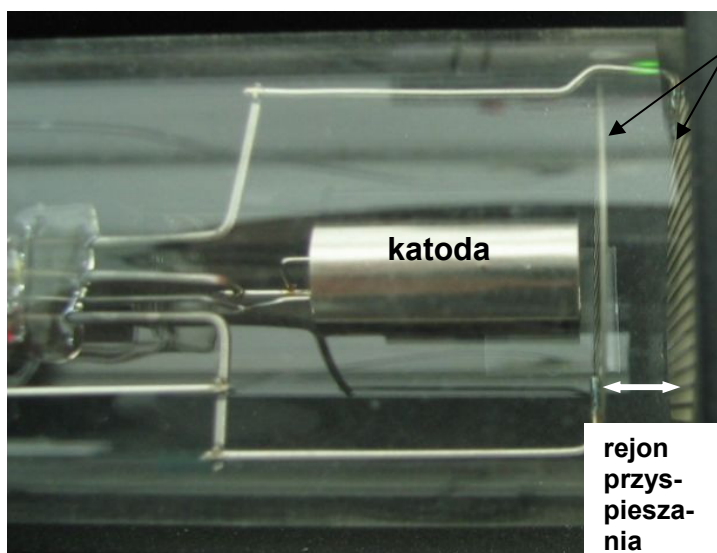
Stanowisko ćwiczeniowe.



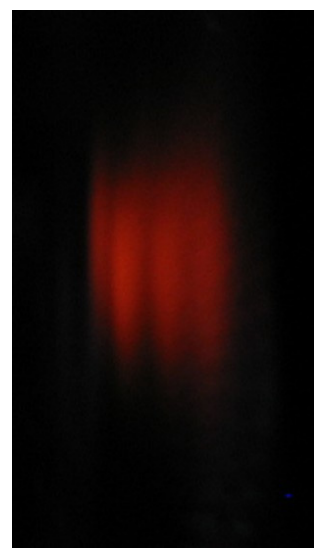
Rys. 2. Widok ogólny stanowiska (bez komputera).



Rys. 3. Lampa ze schematem połączeń



Rys. 4. Bańka lampy z elektrodami.



Rys. 5. Świecenie neonu w „rejonach wzbudzenia”.

Przebieg ćwiczenia.

W naszym zestawie ćwiczeniowym napięcie przyspieszające o maksymalnej wartości ok. 80 V podawane jest poprzez układ RC o stałej czasowej rzędu 100 s. Dzięki powolnemu narastaniu tego napięcia w lampie, można łatwo śledzić zmiany zachodzące w wartości prądu anodowego mierzonego jako spadek napięcia na oporniku włączonym szeregowo w obwód anody. Ewentualne zmiany w przebiegu ćwiczenia wynikające z jego modyfikacji zawsze będą opisane w części informacyjnej programu (zakładka „Informacje”).

Odłącz napięcie przyspieszające przez wyciśnięcie czerwonego przycisku na panelu sterującym lampy. W programie wybierz zakładkę „Pomiar”. Dwa górne wykresy będą pokazywać jak zmienia się w czasie napięcie przyspieszające i prąd anodowy. Trzeci wykres przedstawi zależność prądu anodowego od napięcia przyspieszającego. Przy wyciśniętym czerwonym przycisku zarówno wartość napięcia przyspieszającego jak i prądu anodowego oscyluje w pobliżu zera.

Naciśnij czerwony przycisk na panelu sterującym i przycisk „Start” w programie. Poprzez układ RC napięcie przyspieszające powoli narasta od zera do ok. 80 V. Obserwuj zmiany prądu anodowego. Przycisk „Stop” zatrzymuje pomiar. Ponowne naciśnięcie na „Start” w programie usuwa zebrane dane i rozpoczyna ponowną rejestrację (pamiętaj o wyciśnięciu i wciśnięciu czerwonego przycisku).

W przyciemnionym świetle lub pod osłoną chroniącą przed światłem z pomieszczenia obserwuj obszar pomiędzy siatkami (Rys. 4) w czasie narastania napięcia. Spróbuj zauważyć pojawianie się czerwonych pasków świecącego neonu przesuwających się stopniowo od jednej siatki do drugiej. Przy maksymalnym napięciu obraz powinien przypominać ten pokazany na Rys. 5.

Zarejestruj jeden typowy przebieg $I(U)$ i po zatrzymaniu pomiaru (przycisk „Stop”) przejdź w programie do zakładki „Analiza”. Powiększony wykres z dwoma kursorami pozwoli na łatwe odczytywanie położenia minimów wartości prądu anodowego w lampie. Ponadto można spróbować „wprostować” zależność $I(U)$ dzieląc zmierzone wartości przez hipotetyczne wartości prądu I_0 , jakie płynąłby przez lampę bez zawartego w niej gazu. Te ostatnie otrzymujemy z założeń, że napięcie na siatce liniowo zwiększa prąd anody oraz że pomiędzy minimami lampa zachowuje się jak próżniowa. Odpowiednimi pokrętkami w oknie programu dopasowujemy prostą do odcinków $I(U)$ leżących pomiędzy minimami i obserwujemy na drugim wykresie zachowanie I/I_0 jako funkcję napięcia przyspieszającego. W tej reprezentacji lepiej widać zmiany względnej głębokości minimów. Pamiętaj, że ze względu na potencjał hamujący i pracę wyjścia, prosta $I_0(U)$ nie musi przechodzić przez początek układu.

Klawisze „Kopiuj” we wszystkich częściach programu pozwalają na skopiowanie odpowiednich wykresów do schowka systemu Windows, co umożliwi wklejenie ich do protokołu. Format WMF zapewnia niewielki rozmiar plików i skalowalność rysunków.

Na pulpicie komputera znajdziesz program IrfanView, który można wykorzystać do prostej obróbki obrazów bitmapowych, np. wyglądu okna programu uzyskanego przez naciśnięcie klawisza Alt-PrintScreen. Zapis w formacie GIF lub PNG pozwoli zmieścić obrazy nawet na dyskietce.

Uwagi końcowe

W protokole, oprócz wyniku podstawowego w postaci wykresu zależności $I(U)$ oraz zapisu obserwacji świecenia lampy, powinny znaleźć się odpowiedzi na następujące pytania:

1. Jaka jest optymalna (dla wyrazistości badanego zjawiska) wartość drogi swobodnej elektronu? Jak dobrać ciśnienie gazu?
2. Dlaczego minima w zależności $I(U)$ występują w regularnych odstępach? Dla czterech pierwszych obszarów wzbudzeń oblicz prędkości tych elektronów, które dotarły do tych miejsc bez utraty energii. Jaką prędkość miały te, które doprowadziły do wzbudzenia?
3. Jaka jest wartość energii wzbudzenia atomu neonu? Czy odpowiadająca tej energii długość fali zgadza się z obserwowaną czerwoną barwą emitowanego światła? Podaj przyczynę rozbieżności i wymień dwie grupy przyrządów wykorzystujących świecenie neonu.
4. Co wyznacza szerokość minimów? Dlaczego maleje względna głębokość kolejnych minimów?
5. Jaka jest prędkość elektronów, przy której następuje wzbudzenie atomów neonu? Masa elektronu to $9,1 \times 10^{-31}$ kg, a jego ładunek to $1,6 \times 10^{-19}$ C.
6. Oszacuj zasadność założenia o słabej wymianie energii kinetycznej pomiędzy elektronami i atomami neonu. Oblicz prędkość jaką uzyska nieruchomy atom neonu przy centralnym zderzeniu z elektronem rozpędzonym do prędkości obliczonej w zadaniu 5. Stosunek mas atomu neonu i elektronu wynosi ok. 40 000. Skorzystaj z zasady zachowania pędu i energii.