

Pracownia dydaktyki fizyki

Fizyka współczesna

Instrukcja dla studentów

Tematy ćwiczeń

- I. Wyznaczanie stałej Plancka z wykorzystaniem zjawiska fotoelektrycznego
- II. Wyznaczanie stosunku e/m

I. Wyznaczanie stałej Plancka z wykorzystaniem zjawiska fotoelektrycznego

1. Wstęp teoretyczny

Zjawisko fotoelektryczne polega na tym, że w wyniku oświetlenia określonym promieniowaniem elektromagnetycznym z powierzchni metalu wybijane są elektrony.

Zjawisko znane było w końcu XIX w. W świetle teorii falowej mogło być interpretowane w ten sposób, że fala elektromagnetyczna, która niesie ze sobą energię, wybija z sieci krystalicznej metalu elektrony luźno związane z atomami. Gdy jednak doświadczalnie udało się ustalić prawidłowości rządzące tym zjawiskiem, okazało się, że są one w sprzeczności z teorią falową światła. Jakże to były sprzeczności? Przede wszystkim, zjawisko fotoelektryczne powinno zachodzić dla fal elektromagnetycznych o dowolnych długościach fali, byle tylko natężenie fali było dostatecznie duże.

Przypomnijmy, że natężenie fali elektromagnetycznej jest równe ilości energii przenoszonej w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię prostopadłą do kierunku rozchodzenia się fali. A więc natężenie fali jest miarą energii niesionej przez nią, a co za tym idzie – energii padającej na powierzchnię metalu. I tu jest pierwsza niespodzianka: stwierdzono, że:

dla każdego metalu istnieje pewna częstotliwość graniczna, poniżej której zjawisko nie zachodzi.

Nic nie pomaga zwiększenie natężenia oświetlenia. Dodajmy, że zjawisko może zachodzić zarówno w nadfiolecie, podczerwieni, jak i w zakresie fal widzialnych, ale częstotliwość graniczna jest zależna od rodzaju metalu. Częstotliwości granicznej odpowiada graniczna długość fali zgodnie z zależnością

$$\nu_{gr} = \frac{c}{\lambda_{gr}}$$

c – prędkość światła w próżni, λ_{gr} – graniczna długość fali, ν_{gr} – graniczna częstotliwość.

Mówimy o długofalowej granicy zjawiska fotoelektrycznego. Innymi słowy, może być tak, że oświetlimy płytkę metalową silnym światłem czerwonym i fotoefektu nie będzie, podczas gdy bardzo nisko światło fioletowe spowoduje, że elektrony zostaną wyemitowane.

Drugą sprzeczność z teorią falową stanowi fakt, że:

energia emitowanych elektronów zależy od częstotliwości (długości) fali, a nie zależy od jej natężenia.

Przypomnijmy, że natężenie fali jest związane z jej energią. Im większe natężenie, tym większa energia. Elektrony wybijane z sieci krystalicznej, w myśl teorii falowej, powinny tę energię przejmować, częstotliwość nie powinna odgrywać tu żadnej roli. Doświadczenie pokazuje co innego – im większa częstotliwość, tym większa energia emitowanych elektronów.

Maksymalną energię kinetyczną możemy zmierzyć, ustalając, przy jakim potencjale hamującym natężenie fotoprądu jest równe zero. Oznacza to, że pole elektryczne zatrzymało wszystkie elektrony, nawet te o największej energii

Zatrzymanie nośnika oznacza, że zmiana energii kinetycznej ΔE_k jest równa pracy pola elektrycznego $W = q \Delta V$, gdzie q jest ładunkiem elektronu (o wartości ładunku elementarnego oznaczanego literą e), a ΔV jest różnicą potencjałów pomiędzy elektrodami. Tak więc:

$$W = \Delta E_k$$
$$e\Delta V = \frac{mv_{\max}^2}{2},$$
$$eV_h = \frac{mv_{\max}^2}{2}$$

gdzie $\Delta V = V_h$ – potencjał hamujący.

Teoria falowa dopuszcza możliwość kumulowania energii padającej na metal.

W konsekwencji mogłoby być tak, że elektrony opuszczą metal, gdy zaabsorbują dostatecznie dużą jej porcję. Istniałaby więc możliwość opóźnienia emisji elektronu do chwili, aż uzyska on dostateczną energię. I znów takiego efektu nie obserwuje się. Emisja elektronów następuje w momencie oświetlenia.

I jeszcze jedna prawidłowość: natężenie prądu, który pojawia się w obwodzie, jest proporcjonalne do natężenia światła oświetlającego katodę. Im większe jest natężenie oświetlenia, tym większe natężenie jest prądu. To prawo nie jest sprzeczne z teorią falową, bo fala o większej energii powinna wybijać więcej elektronów.

Podsumujmy prawidłowości zjawiska fotoelektrycznego:

- Istnienie dla każdego metalu granicznej częstotliwości, poniżej której zjawisko nie zachodzi,
- Prędkości elektronów wybijanych z metalu zależy od częstotliwości padającego promieniowania,
- Brak opóźnienia emisji elektronów po oświetleniu katody.
- Natężenie prądu (fotoprądu) zależy od natężenia oświetlenia

Zjawisko fotoelektryczne zostało odkryte w końcu wieku XIX. Na początku wieku XX niezależnie od siebie badali zjawisko fotoelektryczne dwaj doskonali eksperymentatorzy: Philip Lenard i Robert Millikan, a jego interpretację podał w 1905 roku Albert Einstein. Wykorzystał on hipotezę Maxa Plancka pozwalającą wyjaśnić zjawisko promieniowania ciała. Planck przyjął, że światło emitowane jest w postaci porcji energii – kwantów energii. Kwanty energii nazywa się także fotonami. Wartość kwantu energii E zależy od częstotliwości promieniowania ν :

$$E = h\nu$$

h – stała fizyczna, która została nazwana stałą Plancka.

Einstein zinterpretował zjawisko fotoelektryczne jako zderzenie dwóch cząstek: fotonu i elektronu związanego w sieci krystalicznej metalu. Jeden foton o energii $E = h\nu$ wybija jeden elektron, przy czym energia fotonu (kwantu promieniowania) zostaje zużyta na pokonanie sił wiążących elektron w sieci oraz na nadanie elektronowi energii kinetycznej. Energia potrzebna na wybite elektronu z sieci jest zależna od rodzaju metalu i równa pracy wyjścia z metalu – W . Staje się oczywiste, że jeśli energia kwantu jest zbyt mała (częstotliwość promieniowania mniejsza od granicznej), to zjawisko nie występuje. Jeśli natomiast, energia kwantu jest równa pracy wyjścia, to elektrony zostają wybite, ale nie mają żadnej prędkości. Wszystko co zostało powiedziane przed chwilą można zapisać w formie matematycznej zależności:

Energia kwantu = praca wyjścia + energia kinetyczna elektronu.

W postaci symboli zapisujemy następująco: $h\nu = W + \frac{mv^2}{2}$

Jest to wzór Millikana-Einsteina.

Dla częstotliwości granicznej mamy:

$$h\nu_{gr} = \frac{hc}{\lambda_{gr}} = W$$

ν_{gr} – częstotliwość graniczna, λ_{gr} – długość fali graniczna.

Wcześniej mówiliśmy o tym, że prędkość i energię kinetyczną najszybszych elektronów można wyznaczyć doświadczalnie hamując je odpowiednio wysokim napięciem przyłożonym do elektrod. A więc wzór Millikana –Einsteina można zapisać w innej postaci:

$$h\nu = h\nu_{gr} + eV_h .$$

Z ostatniej postaci wzoru Millikana-Einsteina wynika, że potencjał hamujący zależy od częstotliwości promieniowania, częstotliwości kwantu wywołującego fotoefekt.

2. Układ pomiarowy

Układ pomiarowy składa się z :

- Fotokomórki,
- pięciu filtrów interferencyjnych dających światło o długości fali: 366 nm, 405 nm, 436 nm, 546 nm, 578 nm.
- Lampy rtęciowej i zasilacza do lampy, miernika napięcia, elektrometru - wzmacniacza

3. Przebieg doświadczenia

Pomiędzy anodą i katodą fotokomórki przyłożone jest niewielkie napięcie . Elektrony wybite z katody na skutek promieniowania o częstotliwości ν podążają w kierunku anody i ładują ją ujemnie. Po kilku sekundach osiągnięty jest stan równowagi i nawet elektrony o najwyższej energii mają jej za mało, aby pokonać siły pola elektrostatycznego i dotrzeć do anody. Potencjał anody jest tak wysoki, że nie pozwala dotrzeć do niej kolejnym elektronom. Jest on miarą energii kinetycznej elektronów.

$$h\nu = W + eU$$

$$U = \frac{h}{e}\nu - \frac{W}{e}$$

Otrzymujemy liniową zależność pomiędzy napięciem i częstotliwością. Tę zależność należy wyznaczyć. Współczynnik kierunkowy tej prostej jest równy h/e . Wartość ładunku elementarnego przyjmujemy za znaną.

4. Tabela pomiarowa

Długość fali	Częstotliwość fali	napięcie

Na podstawie uzyskanych pomiarów należy wykreślić linię prostą i obliczyć współczynnik kierunkowy, a następnie stałą Plancka.

II. Wyznaczanie stosunku e/m dla elektronu.

1. Wprowadzenie teoretyczne

Na poruszające się w polu magnetycznym elektrony działa siła (magnetyczna) Lorentza, której maksymalna wartość, gdy prędkość cząstek v jest prostopadła do wektora indukcji magnetycznej B jest równa

$$F = e v B,$$

gdzie e – ładunek elektronu.

Siła ta powoduje, że elektrony poruszają się po okręgu. Jest więc ona siłą dośrodkową.

$$evB = \frac{mv^2}{r}.$$

Zatem

$$v = \frac{e}{m} Br \tag{1}$$

Cząstki naładowane rozpędzamy w polu elektrycznym między punktami o napięciu U . Zmiana energii kinetycznej cząstek jest równa pracy pola elektrycznego. Jeśli początkowa prędkość cząstek była równa zero, to pole elektryczne o napięciu U spowoduje przyspieszenie cząstek do prędkości v . Z zasady zachowania energii wynika równość;

$$\frac{mv^2}{2} = eU$$

$$\text{Stąd prędkość } v = \sqrt{2U \frac{e}{m}} \tag{2}$$

Prędkość zależy od napięcia przyspieszającego.

Ze wzorów (1) i (2) wyliczamy stosunek e/m

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{r^2 B^2}.$$

2. Układ doświadczalny

Układ doświadczalny składa się z:

- Lampy próżniowej, w której przyspieszane są elektrony. Lampa wypełniona jest argonem pod ciśnieniem 0,1 Pa. Gaz jest konieczny, aby widać było tor ruchu elektronów w postaci jasnoniebieskiej smugi. Źródłem elektronów jest żarzona katoda. Gdy nie ma pola magnetycznego, elektrony poruszają się ku górze. Ich prędkość jest regulowana napięciem przyspieszającym U , które może się zmieniać w granicach 50V-300 V. W środku lampy wzdłuż jej średnicy jest poziomo ustawiona drabinka, która pozwala na mierzenie średnicy okręgu, po którym poruszają się elektrony;
- Cewek Helmholtza, które są źródłem pola magnetycznego. Są to dwie sztywnych cewki z ciasno nawiniętymi przewodnikami. Mają promień $R = 20$ cm i liczbę zwojów

$n = 154$. Cewki połączone są szeregowo ze sobą i ze źródłem prądu. Pole magnetyczne wytworzone przez tak ukształtowane cewki zależy od odległości d od nich, od natężenia prądu – I , liczby zwojów - n , promienia cewek - R

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + d^2)^{3/2}}$$

Uwzględniając geometrię przyrządu powyższy wzór można zapisać w prostszej postaci:

$$B = 0,715 \mu_0 \frac{nI}{R}$$

$$\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Tm/A.}$$

Centralnie, w środku umieszcza się lampę. Pole magnetyczne decyduje o torze elektronów.

- Zasilacza.
- Amperomierza do pomiaru natężenia prądu, który płynie przez cewki Helmholtza oraz miernika napięcia przyspieszającego elektrony.

3. Przebieg doświadczenia:

- Włącz napięcie żarzenia i napięcie przyspieszające. Po chwili zaobserwuj tor elektronów.
- Włącz zasilanie cewek i zaobserwuj ponownie tor elektronów.
- Ustaw napięcie przyspieszające tak, aby średnica okręgu, po którym poruszają się elektrony była równa 3, 4 lub 5 centymetrów, co odpowiada oświetleniu kolejnych szczebelków poziomo ustawionej drabinki wewnątrz lampy.
- Zanotuj w tabeli wartości napięcia przyspieszającego i natężenia prądu wytwarzającego pole magnetyczne.

4. Wyniki pomiarów

Promień okręgu	Napięcie $U[V]$	Natężenie $I[A]$	Indukcja magnetyczna $B[T]$	e/m
2 cm				
3cm				
4cm				
5cm				