



ĆWICZENIE

17

LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ

Zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest potwierdzenie równania Einsteina opisującego zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne oraz pomiar wartości stałej Plancka h .

2. Układ doświadczalny

W skład układu pomiarowego (rys. 1) wchodzi:

- lampa rtęciowa jako źródło światła widzialnego i nadfioletu,
- zestaw filtrów interferencyjnych,
- fotokomórka z siarczku ołowiu (PbS) z okienkiem ze szkła kwarcowego,
- elektrometr o dużym oporze wejściowym,
- woltomierz.

Do budowy komórki i lampy rtęciowej został użyte szkło kwarcowe, ponieważ powszechnie używane szkło sodowe nie przepuszcza nadfioletu.

Elektrometr w układzie jest potrzebny, bo woltomierz podłączony bezpośrednio do fotokomórki spowodowałby przepływ prądu w obwodzie i spadek mierzonego napięcia, co zafałszowałoby pomiar. Obecność elektrometru powoduje, że natężenie tego prądu spada znacznie i jego wpływ na mierzone napięcie jest nieznaczne.



Rys. 1. Wygląd układu pomiarowego.

3. Wstęp teoretyczny

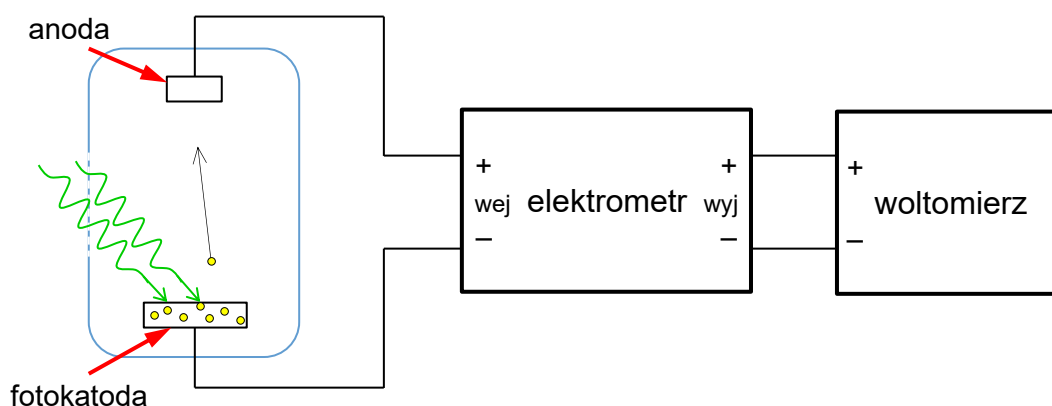
1. Zjawisko emisji elektronów pod wpływem światła

W ośrodkach materialnych takich jak metale znajdują się elektrony nie związane z konkretnymi atomami. Są to tak zwane elektrony przewodnictwa, bowiem to ich ruch jest przepływem prądu elektrycznego w danym materiale. Są one jednak związane z przewodnikiem jako całością i nie opuszczają go w sposób dowolny. Aby elektron mógł być wyemitowany z takiego przewodnika potrzebuje odpowiednio dużej energii. Energia ta może być dostarczona przez padające na powierzchnię przewodnika światło. Zjawisko takiej emisji elektronów pod wpływem światła nazywa się *efektem fotoelektrycznym zewnętrznym*.

Efekt fotoelektryczny zewnętrzny może zachodzić w tzw. *fotokomórkach* zbudowanych jako komory próżniowe z umieszczonymi w środku elektrodami. Elektrode, która jest oświetlana i z której wylatują elektrony, nazywamy fotokatodą, zaś tę, do której elektrony trafiają – anodą.

Zwykle działanie fotokomórki wymaga podłączenia do fotokatody i anody napięcia, które będzie wymuszało ruch elektronów w odpowiednim kierunku, a ze zmianą natężenia światła zmienia się natężenie prądu (zależne od liczby elektronów przelatujących pomiędzy elektrodami).

Jeśli nie poda się zewnętrznego napięcia do fotokomórki, to można zaobserwować, że na jej zaciskach pojawia się różnica potencjałów. Wynika to z tego, że elektrony wylatujące z fotokatody docierając do anody ładują ją ładunkiem elektrycznym ujemnym. W tym samym czasie katoda ładuje się ładunkiem dodatnim i pomiędzy nimi pojawia się pole elektryczne hamujące następne elektrony. W chwili, gdy energia pola elektrostatycznego zrównoważy energię elektronów wylatujących z fotokatody, sytuacja stabilizuje się i napięcie pomiędzy katodą a anodą już się nie zmienia. Innymi słowy można uznać fotokomórkę za kondensator, który ładuje się pod wpływem światła.



Rys. 2. Schemat działania fotokomórki w połączeniu z elektrometrem i woltomierzem

Ponieważ światło jest falą elektromagnetyczną, to nasuwa się podejrzenie, że taka fala wprowadzając elektrony w metalu w ruch oscylacyjny może stopniowo rozpędzać je do prędkości pozwalających na opuszczenie materiału. W takim wypadku ilość elektronów i ich energia powinna zależeć od natężenia fali. „Silniejsza” fala powodowałaby emisję elektronów szybciej i o większych prędkościach (czyli także większych energiach kinetycznych) niż fala „słabsza”.

Eksperymenty pokazują jednak, że tak nie jest. Zjawisko fotoelektryczne nie zależy od natężenia fali i dodatkowo jest natychmiastowe (czyli emisja elektronów następuje od razu po podziałaniu światłem na fotokatodę, a nie z pewnym opóźnieniem pozwalającym na odpowiednie przyspieszenie elektronów zmiennym polem elektrycznym fali). Co więcej, istnieje granica długości fali padającego światła, powyżej której efekt fotoelektryczny nie występuje. Teoria klasyczna, oparta na równaniach Maxwella, miała trudności z wyjaśnieniem tych obserwacji.

2. Hipoteza kwantowa

W 1905 r. Albert Einstein zaproponował rozwiązanie, które opierało się na założeniu, że światło nie jest falą, tylko cząstką. Przy tym założeniu cząstki światła (czyli fotony) zderzałyby się z elektronami i przekazywałyby im swoją energię w sposób natychmiastowy. Zależność energii fotonu od jego częstotliwości Einstein opisał tak samo, jak wcześniej Max Planck wyjaśniając zjawisko promieniowania tzw. *ciała doskonale czarnego* (czyli ciała, które nie odbija żadnego promieniowania elektromagnetycznego):

$$E_f = h \cdot f \quad (1)$$

gdzie E_f to energia fotonu, f to częstotliwość światła, a h to stała wprowadzona przez Plancka.

Dodatkowo Einstein założył, że część energii padającego fotonu zostaje przez elektron zużyta na wydostawanie się z materiału przewodnika. Jest to tak zwana *praca wyjścia* i jej wielkość jest charakterystyczna dla poszczególnych materiałów. Pozostała część energii zostaje przekształcona w energię kinetyczną elektronu. Można zapisać to w postaci równania:

$$E_f = W + E_k \quad (2)$$

gdzie W to praca wyjścia, zaś E_k to energia kinetyczna elektronu.

Poruszające się wewnątrz fotokomórki elektrony są hamowane przez pole elektryczne wytworzone pomiędzy naładowanymi elektrycznie fotokatodą i anodą. Gdy cały układ znajduje się w stanie ustalonym, to cała energia elektronów równoważona jest przez energię tego pola. Można to zapisać w postaci:

$$E_k = e \cdot U \quad (3)$$

gdzie e to ładunek elektronu równy około $1,6 \cdot 10^{-19}$ C, a U to różnica potencjałów pomiędzy fotokatodą i anodą (czyli napięcie, które można zmierzyć).

Łącząc ze sobą równania (1), (2) i (3) można wyprowadzić wzór opisujący zależność napięcia od częstotliwości padającej fali:

$$U = \frac{h}{e} \cdot f - \frac{W}{e} \quad (4)$$

Tę zależność można zweryfikować oświetlając fotokomórkę światłem o różnych częstotliwościach i mierząc napięcie, jakie na niej powstaje.

3. Działanie filtra interferencyjnego

Do przepuszczania światła o tylko jednej, określonej częstotliwości, może służyć filtr interferencyjny. Jego zasada działania opiera się na selektywnym wzmacnianiu i wygaszaniu określonych fal poprzez wielokrotne odbicia pomiędzy półprzepuszczalnymi lustrami umieszczonymi w odległości odpowiadającej danej długości fali. W dielektrycznych filtrach światła jako półprzepuszczalne lustro stosuje się na przemian warstwy o dużym i małym współczynniku załamania światła, a w filtrach metalowych cienkie warstwy srebra lub glinu. Pomiedzy warstwami odbijającymi znajduje się warstwa przepuszczającego światło materiału, w której długość drogi optycznej odpowiada wielokrotności połowy długości fali:

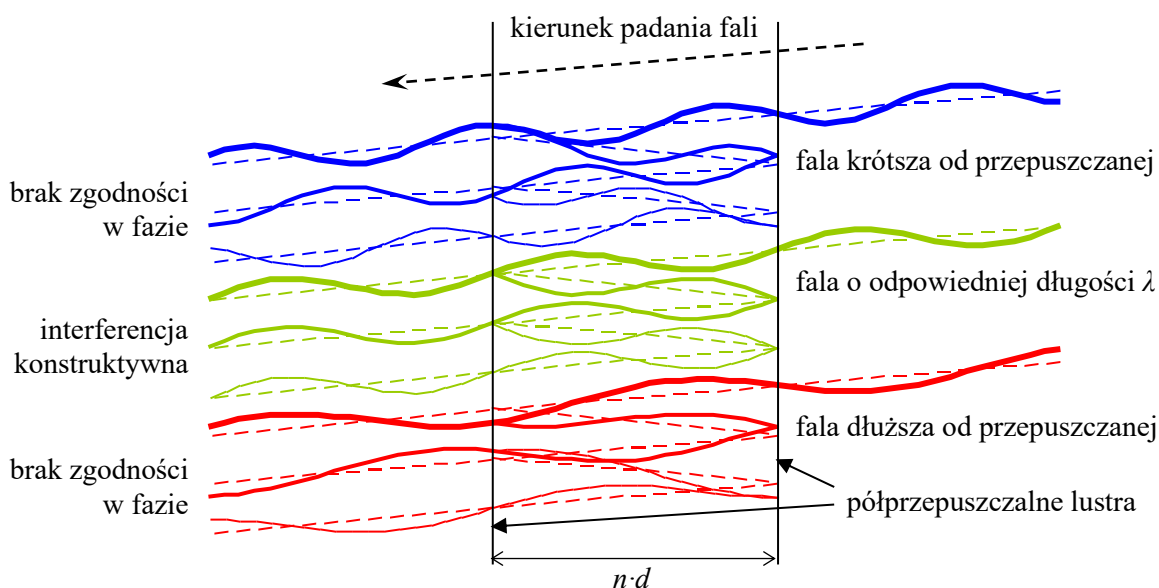
$$n \cdot d = m \cdot \frac{1}{2} \lambda \quad (5)$$

W powyższym równaniu n oznacza współczynnik załamania światła dla danego materiału, d to rzeczywista odległość pomiędzy lustrami, m to dodatnia liczba naturalna, a λ to długość fali elektromagnetycznej, która zależy od jej częstotliwości f w następujący sposób:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (6)$$

gdzie c to prędkość światła w próżni wynosząca około $3 \cdot 10^8$ m/s.

Gdy fala elektromagnetyczna przechodzi przez taki układ lusterek półprzepuszczalnych, częściowo odbija się w środku w tę i z powrotem, a częściowo przechodzi na drugą stronę za każdym razem, gdy trafia na drugie lustro (rys. 3). Łatwo zauważyć, że gdy spełniony jest warunek (5), to przechodzące części fali są ze sobą zsynchronizowane (*zgodne w fazie*) i wzmacniają się (*interferują konstruktywnie*). Takie fale dobrze przechodzą przez filtr. Jeśli ten warunek nie jest spełniony, to fale nie wzmacniają się i nie są tak dobrze przepuszczane przez filtr. Dobierając odpowiednią odległość między lustrami można zatem wybrać, jakiej długości fale będą przepuszczane.



Rys. 3. Schemat działania filtra interferencyjnego

Zjawisko to występuje nie tylko dla światła widzialnego, ale także np. dla mikrofal i fal radiowych, jednak ze względu na długość fali filtry interferencyjne dla światła muszą mieć dużo mniejsze rozmiary niż filtry dla tych fal. W praktyce filtry światła robi się przez napyłanie w próżni kolejnych warstw materiałów dielektrycznych lub przewodzących, a półprzepuszczalnych lusterek jest znacznie więcej niż dwa.

4. Przebieg doświadczenia

A) Sprawdzić poprawność połączenia elementów układu pomiarowego oraz ich ustawienia zgodnie z opisem dołączonym do stanowiska. W razie wątpliwości skonsultować się z obsługą laboratorium.

B) Włączyć układ pomiarowy zgodnie z dołączonym opisem.

Uwaga: w trakcie pracy lampa nagrzewa się do wysokich temperatur! **Należy uważać, by nie ulec poparzeniu** oraz by plastikowe lub łatwopalne przedmioty nie dotykały lampy!

C) Umieścić wybrany filtr interferencyjny pomiędzy lampą a fotokomórką.

D) Wyzerować wskazania woltomierza używając odpowiedniej funkcji elektrometru.

E) Otworzyć okienko fotokomórki i okienko lampy.

Uwaga: światło z lampy jest bardzo intensywne! Nie wolno patrzeć w okienko lampy, gdyż **grozi to czasową bądź trwałą ślepotą!**

F) Odczytać z woltomierza maksymalną wartość napięcia, jaka się ustabilizuje. Odczytaną wartość U zapisać razem z długością fali λ przepuszczanej przez wstawiony filtr.

Uwaga: ze względu na odbijanie się światła wewnątrz fotokomórki istnieje możliwość, że przy intensywnym oświetleniu część fotonów będzie padała także na anodę wybijając z niej elektrony i obniżając mierzone napięcie. Z tego względu wskazana jest delikatna zmiana pozycji przesłon okienka lampy i okienka fotokomórki w celu regulacji ilości światła i redukcji tego zjawiska.

G) Zamknąć okienko fotokomórki i okienko lampy.

H) Pomiary powtórzyć dla wszystkich pozostałych filtrów interferencyjnych, za każdym razem zapisując napięcie U i długość fali λ .

I) Po zakończonych pomiarach i uzgodnieniu z obsługą laboratorium wyłączyć układ pomiarowy zgodnie z dołączonym opisem.

J) Dla każdej długości fali λ obliczyć na podstawie równania (6) odpowiadającą jej częstotliwość f .

K) Wykonać wykres zależności napięcia U od częstotliwości f . Czy punkty układają się na linii prostej? Jeśli tak, to dopasować prostą do otrzymanego wykresu.

L) Z wykresu odczytać współczynniki dopasowanej prostej zgodnie ze równaniem:

$$y = a \cdot x + b \quad (7)$$

Porównując to równanie ze wzorem (4) można zauważyć, że współczynniki dopasowanej prostej powinny być równe:

$$a = \frac{h}{e} \quad (8)$$

$$b = -\frac{W}{e} \quad (9)$$

Na tej podstawie obliczyć wartość stałej Plancka h oraz pracy wyjścia elektronów z siarczku ołowiu W . Czy tak obliczone wartości zgadzają się wartościami tablicowymi?

M) Czy na podstawie wyników tego eksperymentu można odrzucić hipotezę, że światło to strumień fotonów? Czy można odrzucić hipotezę, że światło jest falą elektromagnetyczną?

N) Oszacować niepewności wszystkich zmierzonych oraz obliczonych wartości. Czy znajomość tych niepewności wpływa na wnioski?